# 1

# La luz y los fenómenos relacionados

## NOMENCLATURA

Los rayos gamma, rayos X, rayos ultravioleta, luz visible, infrarroja y las ondas de radio, son todas ellas porciones del espectro electromagnético (fig. 1-1). Cada uno de estos tipos de onda se propaga en el vacío a la velocidad común (*c*) de $3 \times 10^{18}$ Å [1] por segundo, es decir la velocidad de la luz; cada uno tiene una pequeña diferencia de longitud de onda ($\lambda$) y de frecuencia (*f*) comparado con su vecino más próximo. Clasificado el espectro electromagnético tomando como unidad la longitud de onda de la luz, cada parte del mismo abarca una serie continua de longitudes de onda. Existen, ocasionalmente, algunas ambigüedades en la nomenclatura; por ejemplo, los rayos cuya longitud de onda oscila entre 10 Å y 1,0 Å son denominados por algunos autores rayos gamma y por otros rayos X.

La luz visible representa una banda relativamente limitada de longitudes de onda dentro del espectro electromagnético, oscilando de 3900 Å a 7700 Å. Por procesos fotoquímicos aún no conocidos, la luz de una longitud de onda determinada, dentro de este intervalo, produce al incidir normalmente en la retina humana una sensación que es interpretada en el cerebro como un color determinado. La escala ampliada de la figura 1-1 señala la serie de longitudes de onda límites dadas por Hardy y Perrin (1932, pág. 16) para los siete colores distintos del «arco iris» reconocida por Sir Isaac Newton. Sin embargo, P. J. Bouma (1947, pág. 16) eliminó el color índigo de Newton y colocó los límites de las longitudes de onda de los colores como sigue:

| Longitud de onda (Å) | 3800-4360 | 4360-4950 | 4950-5660 | 5660-5890 | 5890-6270 | 6270-7800 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Sensación de color | violeta | azul | verde | amarillo | naranja | rojo |

[1] Una unidad angstrom (Å) es igual a $10^{-8}$ cm ó 1/10 milimicras (símbolo m$\mu$).

Los límites de Bouma para el espectro visible son más amplios, 3800-7800 Å (comparados con los antes citados de 3900-7700 Å) y están probablemente inspirados en los siguientes hechos: 1) algunos ojos humanos pueden detectar luz de longitud de onda mayor o menor que la normal; 2) fuentes de luz muy intensas pueden llegar a emitir luz de los extremos del espectro con energía suficiente para producir una respuesta incluso en un ojo normal.

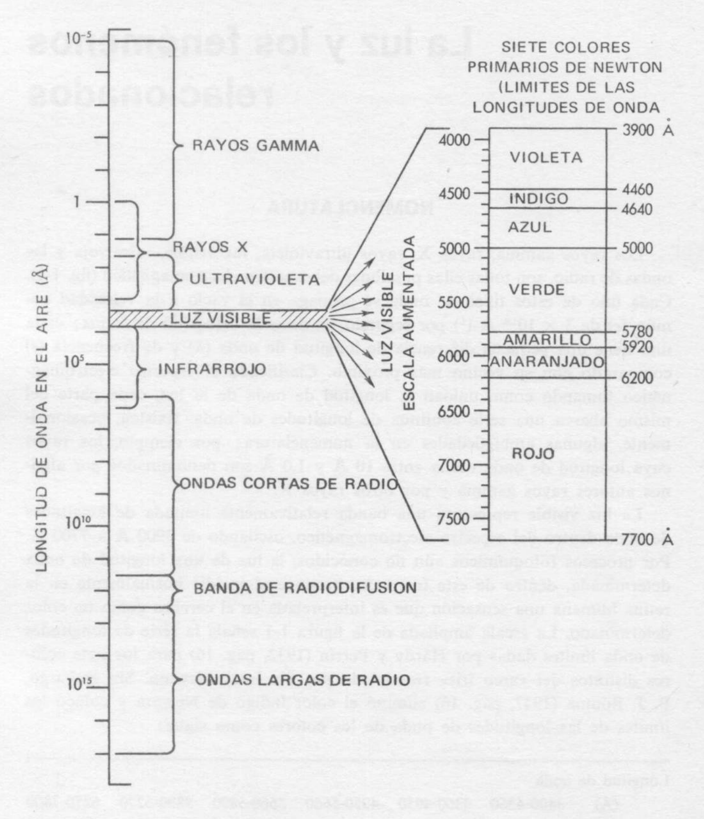



FIGURA 1-1

**La relación entre la luz visible y el espectro electromagnético se muestra a la izquierda (modificado de Sears y Zemansky, 1952). La escala aumentada de la derecha pone de manifiesto el intervalo de longitudes de onda dado por Hardy y Perrin (1932) para los siete colores principales de Newton.**

Cada color del espectro visible, como puede observarse en un arco iris, pasa gradualmente al siguiente. Por tanto, se comprende que los valores límites de longitud de onda de los colores que se dieron antes son algo arbitrarios.

Sería muy difícil, por ejemplo, decidir cuándo una luz de 6250 Å de longitud de onda sería naranja o roja. Así lo demuestra la diferencia de límites entre Bouma y Hardy Perrin (fig. 1-1) con respecto a esta región.

Si a la retina humana llega simultáneamente luz de todas las longitudes de onda (desde 3900 Å a 7700 Å), la luz es interpretada por el cerebro como «luz blanca». Por otra parte, la luz monocromática es la luz de un intervalo de longitudes de onda más estrecho; cuanto más estrecho es el intervalo, más monocromática es la luz. Una lámpara de vapor de sodio, por ejemplo, es una fuente de luz altamente monocromática puesto que emite principalmente luz de longitudes de onda de 5890 Å y 5896 Å. Una lámpara incandescente de tungsteno, la luz de día de una ventana orientada al norte, o la luz directa del sol son, sin embargo, policromáticas; esto es, la energía luminosa se emite en muy diferentes longitudes de onda (fig. 1-2). Para hacer medidas ópticas

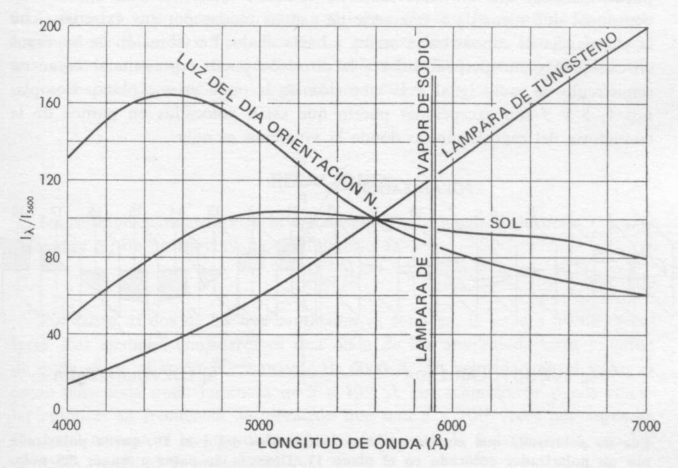



FIGURA 1-2

**La energía luminosa emitida a diferentes longitudes de onda, simbolizada por $I_\lambda$, al compararla con la emitida en longitudes de onda de 5600 Å —que es $I_{5600}$— para tres fuentes luminosas policromáticas: 1) el sol; 2) una típica lámpara de tungsteno rellena de gas (temperatura interna de 2600°C), y 3) luz del día con orientación al N. Si $I_\lambda$ fuera proyectada on lugar de las $I/I_{5600}$, la curva del sol quedaría muy por encima de las otras dos. La energía emitida por una lámpara de vapor de sodio adecuada, principalmente luz de longitudes de onda entre 5890 y 5896 Å, está indicada por dos rayas verticales. Teóricamente las alturas de estas dos líneas son infinitas, no por ser tan ancha $I_{5890}$ o $I_{5896}$, sino porque $I_{5600}$ es igual a cero para esta fuente monocromática.** (En parte según W. D. Wright, 1958.)

de gran exactitud se requieren fuentes de luz altamente monocromática; se usa por lo general la lámpara de sodio. Sin embargo, en el trabajo de rutina se usa la luz de día procedente de una ventana orientada al norte, o, con mayor frecuencia, una lámpara de tungsteno provista de un filtro azul.

## LUZ POLARIZADA

Se considera, generalmente, que la energía luminosa se traslada con un movimiento ondulatorio transversal en el cual la vibración de las partículas es usualmente perpendicular a la dirección en que la energía se desplaza. Como puede verse en el esquema de la mitad derecha de la figura 1-3, la luz de sodio ordinaria (no polarizada) se considera que vibra en numerosas direcciones, todas ellas formando ángulo recto con la dirección del rayo luminoso. Al trasladarse el rayo de energía luminosa desde el plano 1 al plano 11, se puede imaginar que las direcciones de vibración describen una figura tridimensional que recuerda a una serie de canoas unidas por sus extremos, con la alternancia de canoas hacia arriba y hacia abajo. La vibración de los rayos en cualquier plano perpendicular a la dirección puede representarse como un semicírculo de radio igual a la vibración de la onda en ese plano. Los planos 1, 5 y 9 son excepciones puesto que están colocados en puntos de la trayectoria del rayo luminoso donde la vibración es nula.

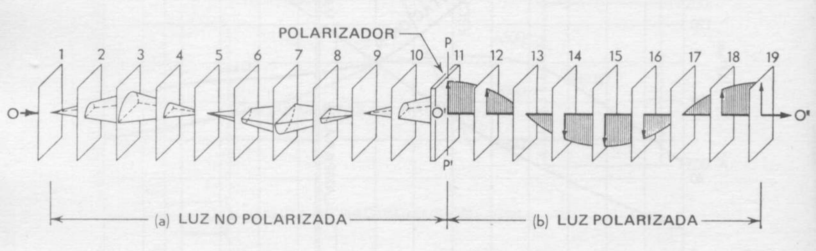



FIGURA 1-3

**Luz no polarizada que atraviesa planos imaginarios del 1 al 10, queda polarizada por un polarizador colocado en el plano 11. Después de pasar a través del polarizador, la luz vibra exclusivamente paralela a PP′, dirección privilegiada del polarizador.**

La luz cuyas vibraciones están restringidas a una única dirección en el espacio —por ejemplo el rayo entre *O′* y *O″* en la figura 1-3— se denomina luz *polarizada plana.* Los materiales o aparatos que convierten la luz ordinaria en luz plana polarizada se denominan en general polarizadores. A la luz que emerge de un polarizador se le ha hecho vibrar paralela a una dirección particular que puede ser llamada, para simplificar, «dirección privilegiada» del

polarizador (²). *PP'* representa la dirección privilegiada del polarizador colocado en el plano 11 de la figura 1-3. *El plano de vibración* de una luz puede definirse como el plano que es paralelo a la trayectoria del rayo y a la dirección de vibración; en la figura 1-3, por tanto, el plano rayado es paralelo a las líneas *O' O''* y *PP'*.

La longitud de onda ($\lambda$) puede definirse como la distancia entre dos puntos consecutivos que presentan vibraciones de igual valor y dirección; se dice que tales puntos están «en fase». Así, en la figura 1-3 la longitud de onda para la luz no polarizada es igual a la distancia entre los planos 1 y 9 (o entre los planos 2 y 10); para la luz polarizada la longitud de onda es igual a la distancia entre los planos 11 y 19; los puntos 11 y 19 están «en fase». La amplitud de una onda se define como el máximo desplazamiento observado en la vibración. Las amplitudes son para la onda no polarizada el radio de los semicírculos que se ven en los planos 3 ó 7 de la figura 1-3; para la onda polarizada la amplitud viene representada por los vectores que se ven en los planos 11, 15 ó 19.

Aunque su amplitud parece ser mayor que la de la onda no polarizada en la figura 1-3, la onda polarizada contiene realmente la mitad de la energía luminosa de la onda no polarizada. La polarización de un haz de luz ordinario produce siempre una pérdida de intensidad. El lector comprenderá esto mejor después de estudiar los siguientes capítulos.

## RELACIONES

La relación standard entre la frecuencia ($f$), la longitud de onda ($\lambda$) y la velocidad ($c$) de un movimiento ondulatorio es

$$c = f\lambda \qquad \text{(Ec. 1-1)}$$

Por tanto, si dos de las tres cantidades se conocen, la tercera puede calcularse. Por ejemplo, consideremos una onda de luz anaranjada cuya longitud de onda es en el vacío precisamente de 6000 Å. Su velocidad en el vacío es como para toda onda luminosa de $3 \times 10^{18}$ Å por segundo. Se puede calcular entonces su frecuencia de vibración que será $5 \times 10^{14}$ veces por segundo. De igual manera el lector puede calcular fácilmente la frecuencia de una luz de sodio (longitud de onda 5893 Å).

La frecuencia de un haz de luz monocromática dado no cambia nunca aunque la luz penetre en un material muy diferente (por decirlo así, su pulso

(²) Siguiendo a algunos físicos británicos —por ejemplo, R. W. Ditchburn (1952, página 369) y R. S. Longhurst (1957, pág. 461)— el término «dirección privilegiada» ha sido sustituido en este texto por el término, más convencional, de «dirección de vibración». La dirección privilegiada se refiere a la dirección de vibración que tomaría la luz al atravesar un polarizador (o una sustancia anisótropa como se definió anteriormente). Una dirección privilegiada existe para un polarizador aun cuando éste no transmita luz, mientras que una dirección de vibración sólo existe, teóricamente, durante la transmisión. La sustitución de la frase «dirección privilegiada del polarizador» por «dirección de vibración del polarizador» evita también al estudiante el visualizar el polarizador como algo en movimiento.

permanece constante). La longitud de onda y la velocidad de esta misma luz *debe cambiar* por el contrario al entrar en un medio diferente. Observemos la velocidad, frecuencia y longitud de onda de esta luz antes y después de pasar de un medio $A$ a un medio $B$, indicándolas como $c_A$, $f_A$ y $\lambda_A$ y como $c_B$, $f_B$ y $\lambda_B$ respectivamente. A causa de la inmutabilidad de su frecuencia, $f_A$ es igual a $f_B$. Uniendo este hecho a la ecuación 1-1 se deduce que

$$\frac{c_A}{c_B} = \frac{\lambda_A}{\lambda_B} \qquad \text{(Ec. 1-2)}$$

esto es, la longitud de onda de la luz que entra en un nuevo medio cambia en la misma proporción que lo hace su velocidad. Así, por ejemplo, si la luz anaranjada de longitud de onda de 6000 Å en el vacío entra en un medio en el cual su velocidad es $1{,}5 \times 10^{18}$ Å por segundo, su longitud de onda se hace igual a 3000 Å (3).

## ÍNDICE DE REFRACCIÓN

El índice de refracción ($n$) de una substancia particular puede ser definido como

$$n = \frac{c}{c_m} \qquad \text{(Ec. 1-3)}$$

donde $c$ y $c_m$ simbolizan la velocidad de la luz en el vacío y en la substancia respectivamente. Para la mayoría de los materiales, $c_m$ es menor que $c$; por consiguiente los índices de refracción son de valor generalmente superior a 1,0. El aire, a través del cual la luz se mueve casi tan rápida como en el vacío, tiene un índice de refracción que puede igualarse a 1,0 en la mayoría de los casos; en realidad, su índice es aproximadamente 1,0003. En general, cuanto mayor es la densidad de una substancia, menor es la rapidez de la luz que se propaga a través de ella. El peso específico alto y el índice de refracción alto son, por tanto, propiedades físicas relacionadas.

La longitud de onda de una luz que entra en un nuevo medio sufre un cambio inversamente proporcional al índice de refracción del nuevo medio. Así,

$$\frac{\lambda_A}{\lambda_B} = \frac{n_B}{n_A} \qquad \text{(Ec. 1-4)}$$

donde $n_A$ y $n_B$ son los índices de refracción de los dos medios citados. La deducción de la ecuación 1-4 a partir de la 1-2 se deja al lector.

(3) Una analogía puede dar explicación a la ecuación 1-2. Imagínese un péndulo, oscilando con frecuencia constante, colocado en un ascensor. Al subir el ascensor a velocidad constante, el extremo del péndulo traza una curva sinusoidal, pues su movimiento de vaivén se suma al movimiento de elevación. Si la velocidad del ascensor se hace el doble, la longitud de la curva sinusoidal también doblará su valor.

## MEDIOS ISÓTROPOS Y ANISÓTROPOS

Aquellos materiales a través de los cuales la luz monocromática pasa a la misma velocidad, *sin tener en cuenta su dirección de vibración*, se denominan medios *isótropos*. Además del vidrio y de los cristales del sistema cúbico se comportan como isótropos frente a la luz y el vacío todos los gases y la mayoría de los líquidos. Otros materiales, principalmente los cristales que no pertenecen al sistema cúbico, son *anisótropos* respecto a la luz; a través de ellos, un rayo de luz puede pasar con velocidades considerablemente distintas para las diferentes direcciones de vibración dentro del cristal. En medios isótropos la dirección de vibración de un rayo de luz es siempre perpendicular a la dirección de la luz; en medios anisótropos, el ángulo que forman las direcciones de vibración y la dirección del rayo puede ser diferente de 90°.

## PREGUNTAS Y PROBLEMAS

**1.** La luz se mueve con una velocidad de $2{,}25 \times 10^{10}$ cm por segundo en el agua. ¿Cuál es el índice de refracción del agua? *Resp.:* 1,333.

**2.** Calcular la frecuencia de la luz cuya longitud de onda es 4861 Å en el vacío. *Resp.:* $6{,}1716 \times 10^{14}$ ciclos por segundo.

**3.** Haciendo el índice de refracción del humor vítreo de un ojo humano igual a 1,336, ¿cuál es la longitud de onda de la luz anaranjada (longitud de onda 6000 Å en el vacío) en este humor? *Resp.:* 4491 Å.

**4.** ¿Cuál es la velocidad de la luz mientras atraviesa un vidrio cuyo índice de refracción es (a) 1,5, (b) 1,9? *Resp.:* (a) $2 \times 10^{18}$ Å por segundo; (b) $1{,}579 \times 10^{18}$ Å por segundo.

# 2

# La luz en los medios isótropos

## REFLEXIÓN Y REFRACCIÓN DE LOS RAYOS

Un rayo que incide sobre una superficie de separación de dos medios isótropos da lugar generalmente a un rayo reflejado (que nunca cruza la superficie de separación), y a un rayo refractado (que lo hace). En la figura 2-1 se puede ver un rayo en el aire, *IO,* que incide sobre un bloque de vidrio de índice de refracción 2,0. El plano de incidencia (*STUV*) se define como el plano que contiene al rayo incidente (*IO*) y a la línea normal a la superficie de separación (que es *NOM*). También contiene al rayo reflejado (*OL*) y al rayo refractado (*OR*) en todos los casos. Los ángulos de incidencia ($i$), de reflexión ($l$) y de refracción ($r$) se definen como los ángulos entre la normal (*NOM*) y los rayos incidentes, reflejado y refractado respectivamente. En todos los casos, el camino que sigue el rayo reflejado puede deducirse de la trayectoria del rayo incidente puesto que

$$i = l \qquad \text{(Ec. 2-1)}$$

### Ley de Snell

La relación entre las trayectorias del rayo incidente y del rayo refractado fueron determinadas por Snell en 1621.

$$n_i \text{ sen } i = n_r \text{ sen } r \qquad \text{(Ec. 2-2)}$$

donde $n_i$ [1] y $n_r$ [1] representan los índices de refracción del medio en el cual se propagan el rayo incidente y el rayo reflejado respectivamente.

Esta relación, conocida como la ley Snell, permite el cálculo de un cuarto valor, dados los otros tres. En la figura 2-1, por ejemplo, si $n_i = 1{,}0$, $n_r = 2{,}0$ e $i = 50°$, uno puede calcular que $r = 22\frac{1}{2}°$.

(1) En ésta y en posteriores discusiones, $n_i$ simbolizará el índice de refracción del medio en el cual se propaga el rayo incidente y $n_r$ simbolizará el índice del medio de refracción.

## Polarización por reflexión y refracción

Como está esquematizado en la figura 2-1, el rayo *IO* no polarizado da lugar a dos rayos parcialmente polarizados: 1) el rayo reflejado *OL* cuyas vibraciones son principalmente perpendiculares al plano de incidencia, y 2) el

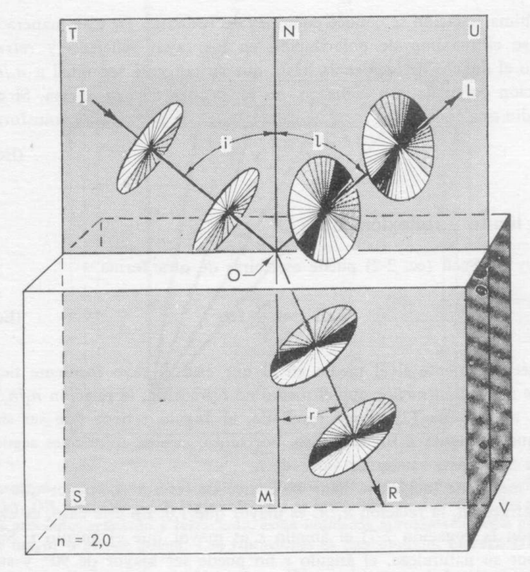



FIGURA 2-1

**Un rayo no polarizado,** IO, **incide en el aire sobre la superficie superior de un bloque de vidrio transparente de índice 2,0, formando un rayo reflejado,** OL, **y un rayo refractado,** OR. **Todas las trayectorias de los rayos, así como los ángulos de incidencia** (i), **de reflexión** (l) **y de refracción** (r) **están situados en el plano de incidencia,** STUV.

rayo refractado *OR*, cuyas vibraciones están contenidas en el plano de incidencia. Brewster en 1812 afirmó que estos dos rayos alcanzan el máximo grado de polarización cuando los ángulos de incidencia y de refracción son complementarios, o, lo que es igual, cuando

$$\text{sen } r = \cos i \qquad \text{(Ec. 2-3)}$$

Escribiendo la ecuación 2-3 de otra forma

$$\frac{n_r}{n_i} = \frac{\text{sen } i}{\text{sen } r} \qquad \text{(Ec. 2-4)}$$

es obvio partiendo de las dos ecuaciones, que,

$$\frac{n_r}{n_i} = \text{tg } i \qquad \text{(Ec. 2-5)}$$

La última ecuación se conoce como ley de Brewster. De esta manera puede producirse el máximo de polarización en los rayos reflejado y refractado ajustando el ángulo de incidencia hasta que su tangente sea igual a $n_r/n_i$. La polarización completa, sin embargo, no se alcanza de esta forma. Si el aire es el medio que contiene al rayo incidente, la ley de Brewster se transforma en

$$n_r = \text{tg } i \qquad \text{(Ec. 2-6)}$$

## Ángulo límite y reflexión total

La ley de Snell (ec. 2-2) puede escribirse de otra forma

$$\text{sen } r = \frac{n_i}{n_r} \text{ sen } i \qquad \text{(Ec. 2-7)}$$

Consecuentemente si el medio en el que está el rayo incidente tiene un índice de refracción menor que el medio de refracción, la relación $n_i/n_r$ siempre será menor que 1,0. Como resultado, el ángulo $r$ tiene que ser siempre menor que el ángulo $i$. En este caso, por tanto, existen soluciones seguras de la ley de Snell para cualquier valor de $i$.

Si el medio de incidencia tiene un índice de refracción mayor que el medio de refracción, la relación $n_i/n_r$ es mayor que 1,0. En este caso, es evidente que (según la ecuación 2-7) el ángulo $r$ es mayor que el ángulo $i$. Sin embargo, por su naturaleza, el ángulo $r$ no puede ser mayor de 90° y su seno no puede exceder de 1,0. Por consiguiente, cualquier caso en que la cantidad

$$\left(\frac{n_i}{n_r} \text{ sen } i\right)$$

tenga un valor mayor que 1,0 no representará una solución verdadera de la ley de Snell. Tales resultados anómalos indican que no hay rayo refractado, pues el rayo incidente queda totalmente reflejado. El valor del ángulo $i$ para el cual la cantidad

$$\left(\frac{n_i}{n_r} \text{ sen } i\right)$$

es exactamente 1,0 se denomina ángulo límite. Para valores de $i$ menores que el ángulo límite no se produce el fenómeno de la reflexión total.

El significado físico del ángulo límite está representado en la figura 2-2. La energía de cada uno de los rayos incidentes, *OA*, *OB* y *OC* queda fraccionada entre un rayo refractado (*AA'*, *BB'* y *CC'* respectivamente) y un rayo reflejado (*AO*, *BB''* y *CC''* respectivamente). Las intensidades relativas de los rayos reflejados y refractados, que se aprecian de forma aproximada en la figura 2-2 por el diferente grosor de los trazos, varía considerablemente de

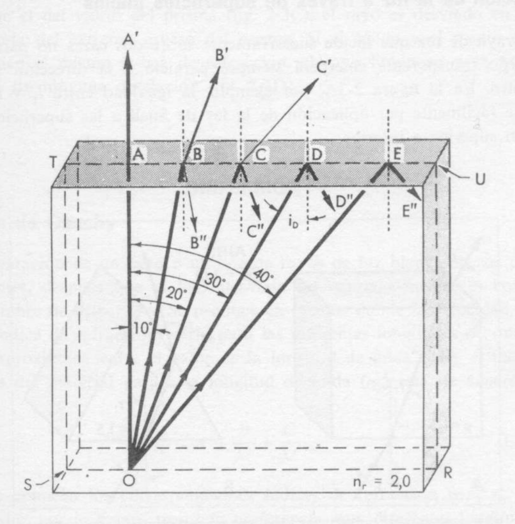



FIGURA 2-2

**Una fuente de luz situada en el punto O dentro de un bloque de vidrio origina los rayos OA, OB, OC, OD y OE (entre otros). Las intensidades relativas de los rayos incidentes asociados reflejado y refractado, están indicadas aproximadamente por las líneas de mayor o menor grosor. Las vibraciones se han omitido. El rayo OD incide con el ángulo límite para el vidrio, $i_D = 30° = ar/\ sen\ \frac{n_i}{n_r}$ («Arcsen $n_r/n_i$» debe leerse como «el ángulo cuyo seno equivale a $n_r/n_i$»).**

acuerdo con el ángulo de incidencia. Para una incidencia normal —por ejemplo el rayo *OA*—, la intensidad del rayo reflejado *AO* es la mínima ([2]). Al aumentar el ángulo de incidencia, sin embargo, el rayo reflejado se hace más intenso mientras que el refractado disminuye de intensidad. Por último, cuando el ángulo de incidencia alcanza el valor límite, el rayo reflejado alcanza el 100 % de la intensidad del rayo incidente. Así, la luz que incide con ángu-

([2]) Solamente para la incidencia normal, la relación entre $I_0$ e $I_i$, las intensidades de los rayos incidente y reflejado es:

$$I_i = I_0 \frac{(n_r - n_i)^2}{(n_r + n_i)^2}$$

los iguales o mayores que el ángulo límite —por ejemplo los rayos *OD* y *OE* en la figura 2-2— sufren la reflexión total, esto es, nada de la energía luminosa que incide es refractada a través de la superficie de separación.

## Refracción de la luz a través de superficies planas

Un rayo de luz que incide sucesivamente sobre dos caras no paralelas de un cuerpo transparente emergerá siempre paralelo a la dirección según la cual entró. En la figura 2-3A, por ejemplo, la igualdad entre $i_1$ y $r_2$ puede probarse fácilmente por aplicación de la ley de Snell a las superficies de separación superior e inferior.

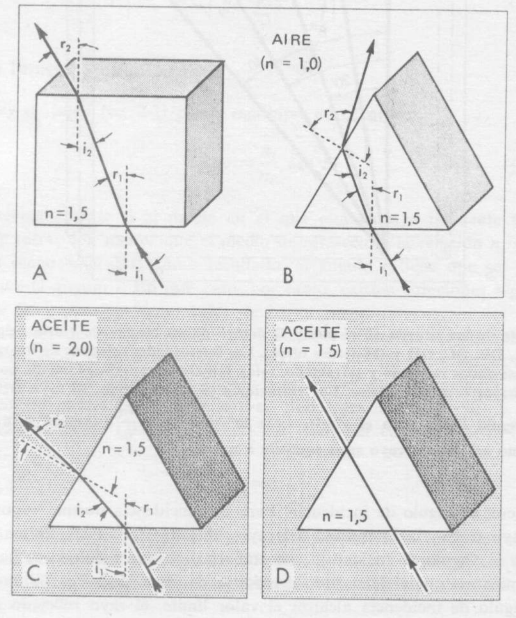



FIGURA 2-3

**Refracción sucesiva de un rayo de luz por dos superficies de separación paralelas (A) y por dos superficies de separación no paralelas (B), (C) o (D). La mitad frontal de cada sólido de vidrio ha sido eliminada para exponer el plano de incidencia. En (C) el prisma de vidrio está sumergido en un aceite de índice mayor que el del vidrio; en (D) el vidrio y el aceite tienen índices idénticos.**

Un rayo de luz que incida sucesivamente sobre dos caras no paralelas de un cuerpo transparente —por ejemplo, un prisma óptico— generalmente no emergerá del segundo plano a lo largo de su dirección original. Por ejemplo, en la figura 2-3B, donde el prisma de vidrio está rodeado por un medio de índice de refracción más bajo, el rayo de salida está desviado hacia el extremo más grueso del prisma. Sin embargo, en un aceite de índice de refracción mayor que el del vidrio del prisma (fig. 2-3C), el rayo es desviado en dirección opuesta del extremo grueso del prisma. Si el sólido y el medio que lo rodea tienen el mismo índice de refracción, el rayo luminoso pasa a través del sólido sin ninguna desviación (fig. 2-3D).

## DISPERSIÓN

### Ecuación de Cauchy

La separación de un rayo o un haz de rayos de luz blanca en sus colores componentes, después que el haz atraviesa un segundo medio, es conocido con el nombre de dispersión. Se produce en medios donde la velocidad, y por tanto el índice de refracción, varía para las diferentes longitudes de onda. La relación aproximada entre el valor de la longitud de onda ($\lambda$) y el índice de refracción del material para esta longitud de onda ($n_\lambda$) está de acuerdo con Cauchy,

$$n_\lambda = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4} \ldots \qquad \text{(Ec. 2-8)}$$

Así, si se conocen los correspondientes índices de refracción ($n_{\lambda_1}$, $n_{\lambda_2}$ y $n_{\lambda_3}$) de un medio, por lo menos tres, con preferencia muy diferentes longitudes de onda ($\lambda_1$, $\lambda_2$ y $\lambda_3$) entonces cada par de valores (por ejemplo $\lambda_1$ y $n_{\lambda_1}$) puede ser sustituido en la ecuación 2-8 para dar tres ecuaciones lineales (cuyas únicas incógnitas son las constantes de Cauchy, *A, B* y *C*). Los valores reales de *A, B* y *C* pueden ser determinados por medio de la solución simultánea de esas ecuaciones.

### Dispersión de la luz solar

Imaginemos que un prisma de vidrio tiene índices de refracción de 1,600 y 1,500 para luz de longitudes de onda de 3900 Å y 7700 Å, respectivamente. Si el prisma, como en la figura 2-4A, está colocado con su eje vertical paralelo a la rendija *SS'*, solamente un haz de luz solar muy estrecho incidirá sobre el prisma. El mismo ángulo de incidencia, *i*, corresponderá a *SO, S'O'*, y a todos los demás rayos de luz blanca en este haz. Sin embargo, los ángulos de refracción, después de la entrada de cada uno de estos rayos en el prisma, serán diferentes para cada longitud de onda de la luz. Así, para el rayo solar *SO* (fig. 2-4B), $r_{7700}$ y $r_{3900}$, que son los ángulos de refracción dentro del

prisma, para luz de longitudes de onda de 7700 Å y 3900 Å respectivamente, pueden calcularse a partir de la ley de Snell (ec. 2-2)

$$\text{sen } r_{7700} = \frac{\text{sen } i}{1{,}500}$$

y

$$\text{sen } r_{3900} = \frac{\text{sen } i}{1{,}600}$$

Por consiguiente, el ángulo $r_{7700}$ es superior al ángulo $r_{3900}$, como es en general el caso de todas las substancias. Los ángulos de refracción para todos los valores de longitud de onda intermedios representados en la luz blanca por el rayo *SO*, tendrán algún valor comprendido entre $r_{7700}$ y $r_{3900}$, dependiente de su longitud de onda particular. Como resultado, *SO*, después de penetrar en el prisma forma un abanico de rayos de luz coloreada, donde cada rayo está compuesto por luz cuya longitud de onda difiere ligeramente de la de su vecino. *S′ O′*, y los rayos paralelos entre él y *SO*, serán dispersados de igual forma en abanicos de rayos coloreados que quedarán por debajo del abanico representado en la figura 2-4B.

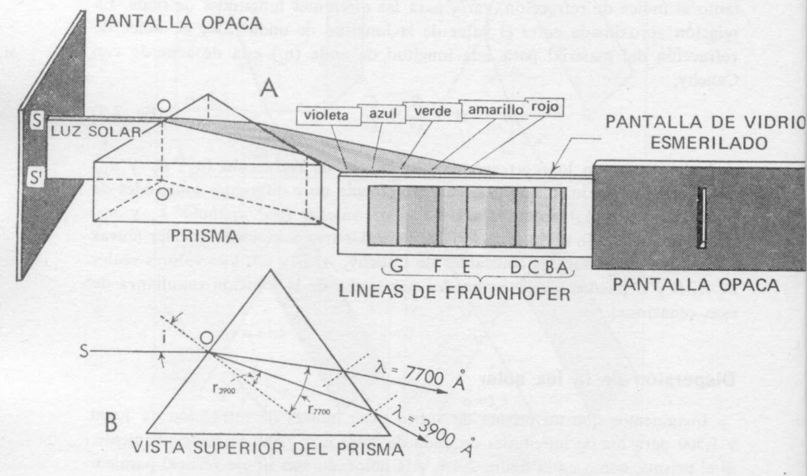



FIGURA 2-4

**(A) Prisma que produce la dispersión de la luz a través de la rendija SS′. Las líneas oscuras de A a G en el espectro resultante son las líneas de Faunhofer. Nótese que si la pantalla opaca está desplazada hacia la izquierda, su rendija aislará luz monocromática de un intervalo de longitudes de onda relativamente estrecho. (B) Vista superior del prisma. Nótese que los dos ángulos diferentes de refracción $r_{3900}$ y $r_{7700}$ se producen a partir del mismo ángulo de incidencia, i.**

## Simbolismo de Fraunhofer

La cuña luminosa con los colores del arco iris, que sale del prisma en la figura 2-4, se denomina espectro. Puede considerarse como formado por una serie de líneas verticales contiguas, cada una de las cuales da luz de una longitud de onda particular; estos colores componentes se denominan «colores espectrales». Wollaston en 1802 y Fraunhofer en 1814 observaron la presencia de numerosas líneas verticales oscuras (se aprecian en la pantalla de vidrio de la figura 2-4A) en el espectro solar una indicación de que determinadas longitudes de onda están ausentes en la luz solar. Fraunhofer denominó a las líneas oscuras más importantes por letras, desde la A a la G. Las longitudes de onda correspondientes a estas líneas de Fraunhofer (tabla 2-1) son

TABLA 2-1

Longitudes de onda de las líneas de Fraunhofer

| *Símbolo de línea* | | *Longitud de onda (Å)* | |
|---|---|---|---|
| A | | 7594 | |
| B | | 6870 | |
| C | | 6563 | |
| $D_1$ | D | 5896 | 5893 |
| $D_2$ | | 5890 | |
| E | | 5269 | |
| F | | 4861 | |
| G | | 4308 | |

de interés general con respecto a los elementos presentes en la atmósfera del Sol. Las letras simbólicas se usan a menudo para referirse a luz de longitudes de onda particulares: el índice de refracción de una substancia para luz de longitud de onda de 5893 Å, por ejemplo, puede simbolizarse como $n_D$ más que como $n_{5893}$. Para un trabajo óptico refinado, los índices de refracción de una substancia se determinan generalmente para luz monocromática correspondiente en longitud de onda a los valores *C*, *D* y *F* de la tabla 2-1. Medidas de precisión hechas en cristales de NaCl indican que $n_C = 1{,}5407$, $n_D = 1{,}5443$ y $n_F = 1{,}5534$. Si sólo se da un índice es generalmente $n_D$. Esto es probablemente porque una lámpara de vapor de sodio con filtro proporciona la fuente de luz más intensa y más monocromática fácilmente asequible a los microscopistas.

## Coeficiente de dispersión

Como ya se ha hecho notar anteriormente, la separación de un haz de luz blanca en sus colores componentes se conoce como dispersión. Como se ve

claramente en la figura 2-4, el valor de la dispersión —que es el grado de separación angular— entre dos rayos luminosos de dos longitudes de onda diferentes depende de la diferencia entre los dos índices de refracción de la substancia para esas longitudes de onda. La diferencia entre los índices de refracción en una substancia para las líneas F (4861 Å) y C (6563 Å) de Fraunhofer —que es en valor $n_F - n_C$— se conoce generalmente con el nombre de *coeficiente de dispersión;* se cita muy comúnmente en la literatura cristalográfica, y a veces sirve como criterio para la identificación de una substancia desconocida. El mineral mullita, por ejemplo, se distingue en ocasiones de la silimanita sólo por su alto coeficiente de dispersión.

## Poder dispersivo

El poder de dispersión de un material se define comúnmente como

$$\frac{n_F - n_C}{n_D - 1}$$

Este valor, aunque algo superior al coeficiente de dispersión como medida de la capacidad de una substancia para dispersar la luz, se cita con menos frecuencia en la literatura cristalográfica. En algunas ocasiones, particularmente para líquidos, el poder dispersivo se define como la inversa del valor anterior, es decir,

$$\frac{n_D - 1}{n_F - n_C}$$

# ABSORCIÓN DE LA LUZ Y COLOR DE TRANSMISIÓN

## Absorción general y específica

La intensidad de un haz de luz decrece al pasar a través de un medio material, debido a que parte de la energía luminosa se transforma en calorífica durante el paso. Este efecto, denominado absorción luminosa, está más acentuado en algunos medios que en otros. Muchas substancias poseen una «absorción general» de todas las longitudes de onda de la luz visible (fig. 2-5, vidrio C); otros muestran una «absorción selectiva o específica», donde longitudes de onda de valor particular son absorbidas más marcadamente (figura 2-5B). Las irisaciones y las vidrieras son ejemplo de los efectos de color producidos por una absorción selectiva. El vidrio azul de una ventana, por ejemplo, absorbe con preferencia las longitudes de ondas rojas de la luz solar incidente, mientras que la luz azul del espectro solar es transmitida (relativamente no absorbida) al interior de la habitación. Por otra parte, el vidrio rojo absorbe con preferencia las longitudes de onda azules para transmitir la luz roja (véase fig. 2-5, vidrio B).

La absorción relativa es la causante de la transmisión de los colores de ciertos minerales y cristales; el color transmitido es a menudo una propiedad que sirve de diagnóstico. En los cristales, se dice que el color es *idiocromático* si se produce por una absorción selectiva del mismo mineral y *alocromático* si es el resultado de una absorción selectiva (o dispersión) de la luz por pequeñas impurezas dispersas por todo el mineral.

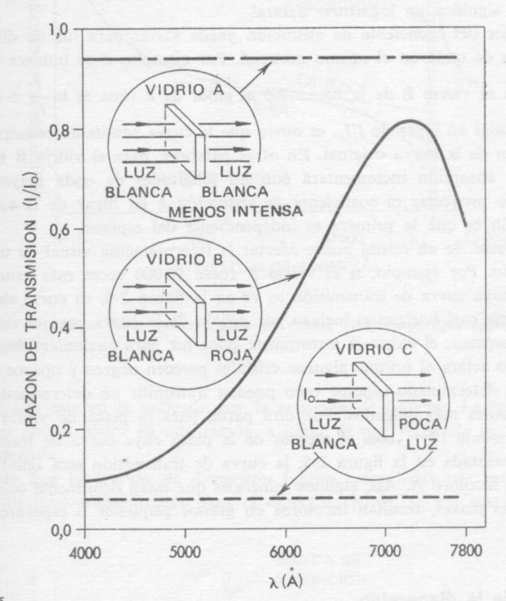



FIGURA 2-5

**Curvas de transmisión de la luz para placas incoloras y transparentes, de vidrio (A), de vidrio rojo (B), y de vidrio casi opaco gris oscuro (C). $I_0$ e I representan respectivamente la intensidad de la luz antes de entrar y después de salir a través del vidrio.**

## Relación con el espesor; coeficientes de absorción

El grado de absorción de la luz por un cristal depende considerablemente de su espesor. La relación se expresa por la ley de Lambert,

$$\frac{I}{I_0} = e^{-kt} \qquad \text{(Ec. 2-9)}$$

donde $I_0$ e $I$ representan, respectivamente, la intensidad de un haz de luz monocromática antes y después de pasar a través de un espesor $t$. El símbolo $e$

es la base de los logaritmos naturales y $k$ es el *coeficiente de absorción* del material a través del cual pasa la luz. La ecuación 2-9 puede expresarse también como

$$\ln \frac{I}{I_0} = -kt \qquad \text{(Ec. 2-10)}$$

donde ln significa un logaritmo natural.

El valor del coeficiente de absorción puede variar para luz de diferentes longitudes de onda en el mismo material. Por ejemplo, si se hubiera proyectado para el vidrio B de la figura 2-5 el valor de $k$ (que es $\ln \frac{I}{I_0} \div -t$) en las ordenadas en lugar de $I/I_0$, es obvio que la curva resultante conservaría la inclinación de la curva original. En otras palabras, para el vidrio B el coeficiente de absorción incrementará con las longitudes de onda mayores. La ventaja de proyectar el coeficiente de absorción $k$ en lugar de la razón de transmisión es que la primera es independiente del espesor.

El espesor de un cristal puede afectar la interpretación visual de un color transmitido. Por ejemplo, si el vidrio B fuese 10 000 veces más grueso que la placa cuya curva de transmisión se ve en la figura 2-5, su curva de transmisión sería casi horizontal incluso por debajo de la curva para el vidrio C; con este espesor, el vidrio B transmitiría poca luz para cualquier longitud de onda. Esto aclara el porqué algunos cristales parecen negros y opacos cuando tienen un determinado espesor pero pueden transmitir un determinado color en sus bordes más delgados. Por otra parte, para la placa de vidrio B que tiene solamente $10^{-4}$ veces el espesor de la placa cuya curva de transmisión está representada en la figura 2-5, la curva de transmisión será igual que la del vidrio incoloro A. Así, algunos minerales que están débilmente coloreados en grandes masas, resultan incoloros en granos pequeños o espesores reducidos.

## Efecto de la dispersión

Si un cristal experimenta una absorción selectiva muy fuerte para un intervalo particular de longitudes de onda, la curva de dispersión no seguirá la relación de Cauchy en las longitudes de onda próximas. Por el contrario, la curva de dispersión será como la curva de línea entera de la figura 2-6. Excepto para la región inmediata de la banda de absorción, estas curvas se aproximan mucho a la fórmula de Sellmeier

$$n^2 = 1 + \frac{A\lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_0^2} \qquad \text{(Ec. 2-11)}$$

donde $A$ es una constante y $\lambda_0$ representa la longitud de onda de máxima absorción. Para cristales de más de una banda de absorción la fórmula se hace más compleja. La fórmula de Sellmeier se aproxima a la de Cauchy si se supone que: 1) sólo hay una banda de absorción, y 2) está colocada lejos

del extremo de longitud de onda corta de la región de longitud de onda que va a ser investigada. En la figura 2-6A está claro que cerca de una banda de absorción la curva de absorción tiene una pendiente hacia abajo mucho más

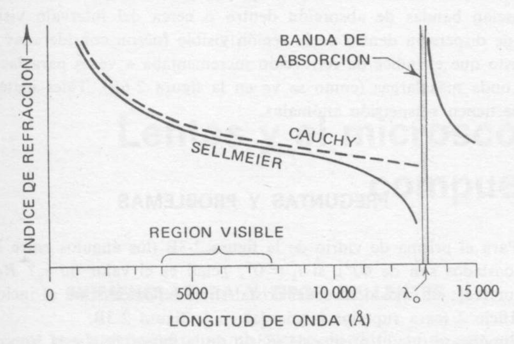



FIGURA 2-6 A

**Curva de dispersión (línea entera) para un cristal con «dispersión normal» en la región visible.**

pronunciada que en la indicada por la ecuación de Cauchy. La fórmula de Sellmeier encaja mejor en esta región, a pesar de que la banda de absorción queda partida.

Desde que las curvas de dispersión fueron recopiladas por primera vez para materiales transparentes para el espectro visible, se vio que cualquier

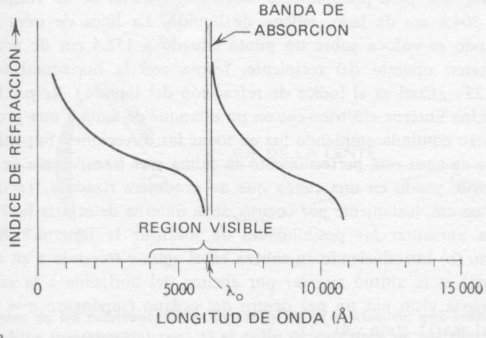



FIGURA 2-6 B

**Curva de dispersión para un cristal que presenta «dispersión anómala» en la región visible.**

banda de absorción de estos materiales estaba generalmente en la región visible. Como consecuencia se llegó al término de *dispersión normal*, es decir, que el índice de refracción decrece para longitudes de onda más largas a través del intervalo visible. Un trabajo posterior se extendió a los materiales que poseían bandas de absorción dentro o cerca del intervalo visible. Las curvas de dispersión dentro de la región visible fueron consideradas anormales, puesto que el índice de refracción incrementaba a veces para las longitudes de onda más largas (como se ve en la figura 2-6B). Tales materiales se dice que tienen «dispersión anómala».

## PREGUNTAS Y PROBLEMAS

**1.** Para el prisma de vidrio de la figura 2-3B (los ángulos entre las caras de sus costados son de 60°), si $i_1 = 0°$, ¿cuál es el valor de $r_2$? *Resp.:* No hay valor real; el rayo dentro del cristal sufre reflexión total al incidir sobre la superficie 2 (cara superior izquierda) en la figura 2-3B.

**2.** Supóngase que el prisma de vidrio de la figura 2-3B está hueco y cada lado (ángulo interfacial también de 60°) es de una delgada lámina de vidrio. El prisma se ha rellenado con un líquido desconocido y se observa como pasa luz de sodio por la cara 1 para salir por la cara 2 con ángulo $i_1 = 30°$ y $r_2 = 61° \ 57{,}3'$. ¿Cuál es el índice de refracción del líquido? *Resp.:* 1,400.

**3.** Calcular los valores de las constantes $A$ y $B$ ($C$ se desprecia), en la ecuación de Cauchy, para el mineral halita ($n_C = 1{,}5407$, $n_D = 1{,}5443$ y $n_F = 1{,}5534$). *Resp.:* $A = 1{,}5253 \pm 0{,}0005$; $B = 6{,}45$ a $6{,}73 \times 10^5$ Å$^2$.

**4.** Pregunta semejante a la anterior para la fluorita ($n_C = 1{,}4325$, $n_D = 1{,}4338$ y $n_F = 1{,}4370$). *Resp.:* $A = 1{,}4270$; $B = 2{,}35$ a $2{,}37 \times 10^5$ Å$^2$.

**5.** El telescopio de una alidada está colocado 152,4 cm por encima del nivel del líquido, pero precisamente sobre una esquina de un recipiente cuadrado de 304,8 cm de lado, relleno de líquido. La línea de mira del telescopio cuando se enfoca sobre un punto situado a 152,4 cm de profundidad en el extremo opuesto del recipiente, forma con la horizontal un ángulo de 35° 32,25′. ¿Cuál es el índice de refracción del líquido? *Resp.:* 1,4001.

**6.** (a) Una linterna eléctrica cae en un estanque de agua a una profundidad de 10 m pero continúa emitiendo luz en todas las direcciones. Suponiendo que el estanque de agua está perfectamente en calma y es transparente ($n = 1{,}333$), el propietario, yendo en una canoa que no produjera rizadura, ¿a qué radio, expresado en cm, justamente por encima de la linterna detectaría luz? (b) ¿Cómo podría aumentar las posibilidades de localizar la linterna? *Respuesta:* (a) 11,34 m. (b) Introduciendo su cabeza en el agua y mirando a su alrededor.

**7.** ¿Cuál es la altitud angular por encima del horizonte a la cual el Sol parece ponerse visto por un pez dentro del océano (supóngase $n = 1{,}33$ para el agua del mar)? *Resp.:* 41° 25′.

# 3

# Lentes y el microscopio compuesto

## NOMENCLATURA Y TIPOS DE LENTES

Una lente puede definirse como un cuerpo de vidrio (o de otra substancia transparente isótropa) que esté limitado, por lo menos, por una superficie curva. La forma de las lentes limitadas por superficies esféricas (los tipos

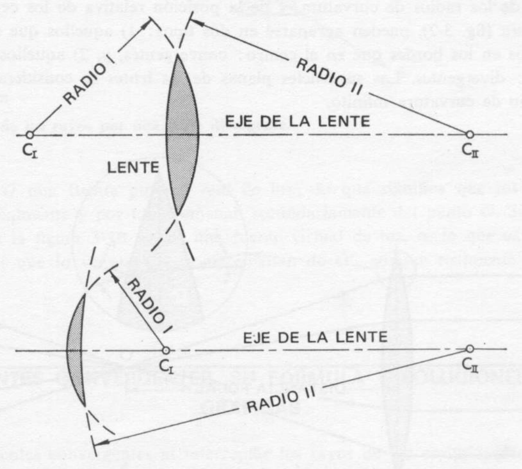



FIGURA 3-1

**Dos ejemplos de las relaciones entre la forma de la sección de una lente (en todos los casos vistos frontalmente) con: 1) el radio de curvatura de sus superficies esféricas y 2) las posiciones relativas de $C_I$, y $C_{II}$, sus centros de curvatura. Las líneas que atraviesan los centros de curvatura y los centros de las lentes se denominan ejes de las lentes.**

más sencillos) depende tanto del radio de curvatura de estas superficies como de la localización relativa de sus centros de curvatura (fig. 3-1). El *eje de una lente* es la línea que une su centro físico con su centro de curvatura. Por definición una *lente delgada* (que no debe confundirse con el término «lente adelgazada en los extremos» que se discutirá más adelante) es aquella cuyo espesor es pequeño comparado con el radio de curvatura.

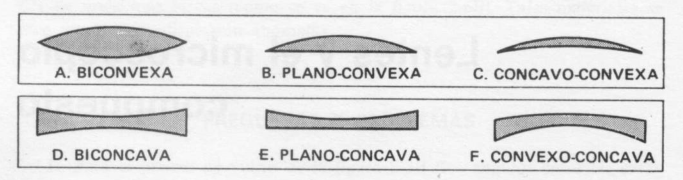



FIGURA 3-2

**Secciones longitudinales de diferentes tipos de lentes (vistas desde arriba son circulares): En la parte superior (A, B, C) lentes (convergentes) de bordes finos; en la inferior (D, E, F) lentes (divergentes) de bordes gruesos.**

Las seis formas básicas de lentes que resultan de las diferentes combinaciones de los radios de curvatura, y de la posición relativa de los centros de curvatura (fig. 3-2), pueden agruparse en dos tipos: 1) aquellos que son más delgados en los bordes que en el centro: convergentes, y, 2) aquellos que no lo son: divergentes. Las superficies planas de las lentes se consideran como de radio de curvatura infinito.

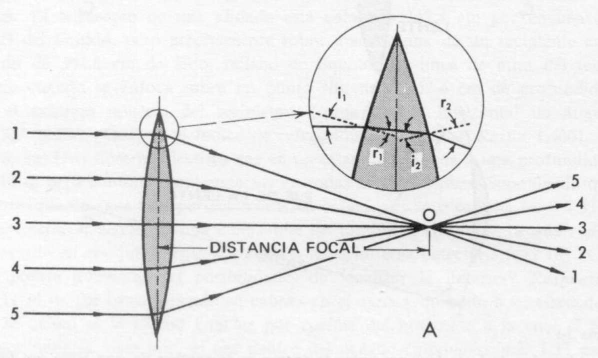



FIGURA 3-3 A

**Enfoque de rayos paralelos al eje de la lente por una lente convergente (en sección longitudinal). El esquema detallado muestra cómo la refracción en la superficie de las lentes está de acuerdo con la ley de Snell.**

Las lentes convergentes, elementos más importantes de los microscopios polarizantes, hacen congregar todos los rayos de luz monocromática que siguen una trayectoria paralela al eje de la lente en un punto denominado *foco principal* (punto *O* en la figura 3-3A); las lentes divergentes, menos importantes para nuestros objetivos, hacen diverger tales rayos, de forma que parece que son emitidos a partir de un punto denominado también *foco principal* (fig. 3-3B). En cada caso, la distancia del foco principal al centro de la lente es denominado *distancia focal* de la lente. Nótese que en la figura 3-3A se

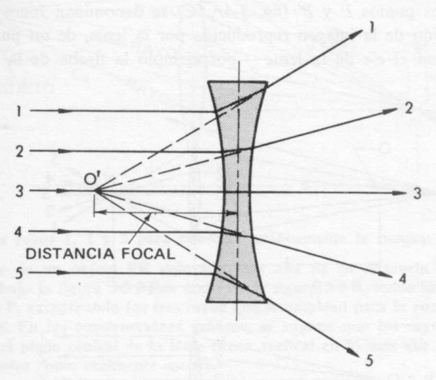



FIGURA 3-3 B

**Enfoque de los rayos por una lente divergente.**

crea en *O* una fuente puntual *real* de luz; lo que significa que los rayos cruzan realmente y por tanto emanan secundariamente del punto *O*. Sin embargo en la figura 3-3B, *O'* es una fuente virtual de luz, o, lo que es igual, parece al que lo ve que los rayos emanan de *O'*, aunque realmente no lo hacen.

## LENTES CONVERGENTES, SU FÓRMULA Y SOLUCIONES GRÁFICAS

Las lentes convergentes al interceptar los rayos de luz emitidos desde un punto, *P*, situado en su eje, los harán converger hacia un punto (fig. 3-4A), hacerse paralelos, o menos divergentes (fig. 3-4C); el efecto se produce si el foco luminoso está situado más cerca, más lejos o a la distancia focal de la lente, respectivamente. Usando *p* y *q* para simbolizar la distancia desde el centro de la lente al foco puntual y a su imagen refractada, respectivamente,

su relación con la distancia focal de la lente se expresa para las lentes convergentes como

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{q} \qquad \text{(Ec. 3-1)}$$

Los valores de $f$ y de $p$ son siempre positivos, pero $q$ puede ser en algunas ocasiones negativo. Un valor negativo de $q$ indica que la imagen del punto es virtual, y está situada del mismo lado de la lente que el punto original (fig. 3-4C). Las distancias $p$ y $q$ se denominan distancias conjugadas; por semejanza, los puntos $P$ y $P'$ (fig. 3-4A, C) se denominan focos conjugados.

La situación de la imagen reproducida por la lente, de un punto que esté situado casi en el eje de la lente —por ejemplo la flecha de la figura 3-5—

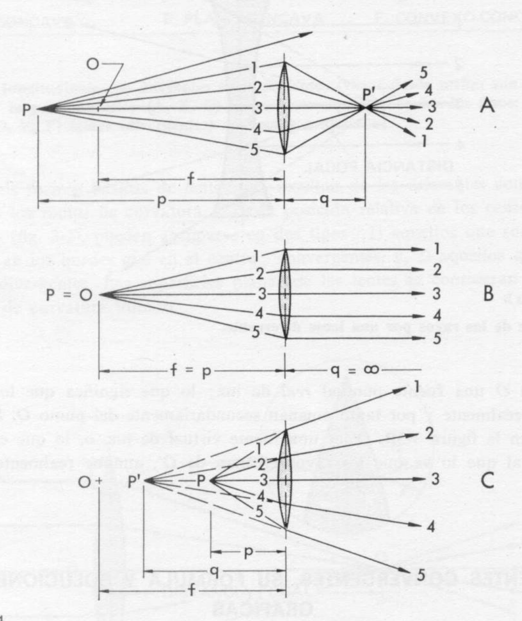



FIGURA 3-4

**Relación entre p (la distancia de P, una fuente puntual de luz, al centro de la lente), f (la distancia focal de la lente) y q (la distancia desde el centro de la lente a P′, la imagen refractada del foco luminoso). (A) p es mayor que f: y su imagen P′, están en lados diferentes de la lente. Después de pasar a través de P′ (una verdadera encrucijada), el rayo 1 se transforma en el inferior. (B) p = f: no se forma imagen P′. Los rayos son paralelos después de pasar a través de la lente. (C) p es menor que f: P′ está ahora al mismo lado de la lente que P. Los rayos del 1 al 5 vistos después de atravesar la lente parece que emanan del punto P′.**

puede determinarse gráficamente como comprobación de la solución de la ecuación 3-1. De esta forma, del infinito número de rayos luminosos que emanan de la flecha, las trayectorias de tres de ellos se conocen incluso antes de que atraviesen la lente. Su intersección (real o aparente) establecerá la situa-

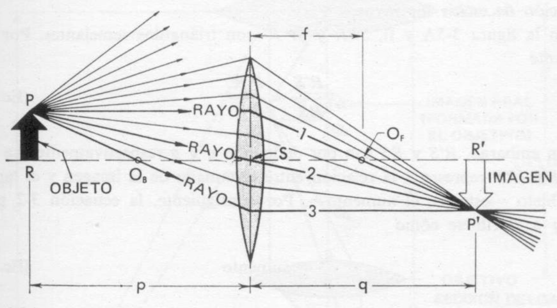



FIGURA 3-5 A

**El uso de los rayos 1, 2 y 3 para construir gráficamente la imagen P′R′ que una lente produce de un objeto $\widehat{PR}$ colocado más allá de su distancia focal, $O_B$S, o (véase más abajo la figura 3-5 B) en $O_B$S. En la figura 3-5 B, todos los rayos que se emitan desde P, exceptuando los tres rayos que se emplean para la construcción, han sido omitidos. En las construcciones gráficas, se supone que los rayos cambian de dirección en el plano central de la lente (línea vertical en S) más que en las superficies de las lentes como realmente sucede.**

ción de *P′*, punto donde *todos* los rayos luminosos que proceden de *P* intersectan (fig. 3-5A) o parece que se cortan (fig. 3-5B). Especificando, las trayectorias de estos tres rayos (fig. 3-5) son como sigue: El rayo 1 se propaga paralelo al eje de la lente antes de traspasarla, y se desvía a $O_F$, el foco principal, después de su refracción por la lente; el rayo 2 pasa por el centro óptico de la lente, y por tanto emerge sin desviación (los planos tangentes

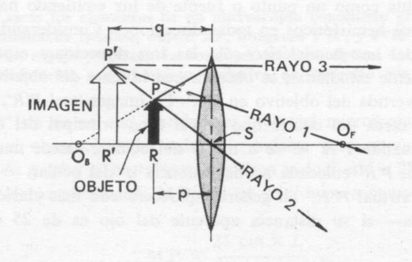



FIGURA 3-5 B

**Véase el pie de la figura 3-5 A.**

a la lente en estos puntos de entrada y salida son paralelos; éste es el caso de la figura 2-3A); el rayo 3 pasa por el foco $O_B$ (fig. 3-5A) o lleva una dirección como si procediera de $O_B$ (fig. 3-5B) y por tanto sale de la lente con una trayectoria paralela al eje de la lente. $R'P'$ (fig. 3-5A) es una *imagen real* de $PR$ mientras que $P'R'$ (fig. 3-5B) es una *imagen virtual* que da la sensación de emitir los rayos.

En la figura 3-5A y B, $SPR$ y $SP'R'$ son triángulos semejantes. Por consiguiente

$$\frac{R'S}{RS} = \frac{P'R'}{PR} \qquad \text{(Ec. 3-2)}$$

Sin embargo, $R'S$ y $RS$ son por definición $q$ y $p$ respectivamente. La relación $P'R'/RP$ representa la relación entre el tamaño de la imagen y el tamaño del objeto —esto es, el aumento—. Por consiguiente, la ecuación 3-2 puede volver a escribirse como

$$\frac{q}{p} = \text{aumento} \qquad \text{(Ec. 3-3)}$$

## EL MICROSCOPIO COMPUESTO

El microscopio compuesto combina dos lentes convergentes, o dos sistemas de lentes, el objetivo y el ocular, montado cada uno en posiciones fijas en los extremos opuestos de un tubo de metal de longitud $L$ (fig. 3-6). Básicamente, el objetivo forma una imagen real aumentada (del objeto que se está examinando) en un punto a menor distancia del ocular que la distancia focal de éste. De esta manera, la imagen real ya aumentada se ve a través del ocular como una imagen virtual aún más aumentada.

El objeto que ha de observarse —$RP$ en la figura 3-6— se monta en una placa de cristal y se coloca en la platina donde se ilumina bien con luz natural o con luz de una lámpara (reflejada hacia arriba con la ayuda de un espejo ajustable). Cuando está iluminado así, cada punto de la flecha transparente $RP$ actúa como un punto o fuente de luz emitiendo hacia arriba un abanico de rayos hemisféricos en todas direcciones. Considerando un punto $P$ y escogiendo del haz hemisférico sólo las tres direcciones especiales de los rayos, previamente estudiadas, se observa que la lente del objetivo forma una imagen real invertida del objetivo en $P'R'$. La imagen real $P'R'$, sin embargo, se forma más cerca del ocular que $O_e$, el foco principal del ocular; como consecuencia cuando $P'R'$ se ve a través del ocular, parece una imagen virtual aumentada, $P'R'$ colocada a una distancia $q'$ del ocular.

La imagen virtual $P''R''$ en general aparecerá con más claridad —esto es, mejor enfocada— si su distancia aparente del ojo es de 25 cm [1]. Si la

(1) El ojo humano normal no es capaz de percibir claramente ningún objeto más próximo de 25 cm, la denominada distancia de visión.

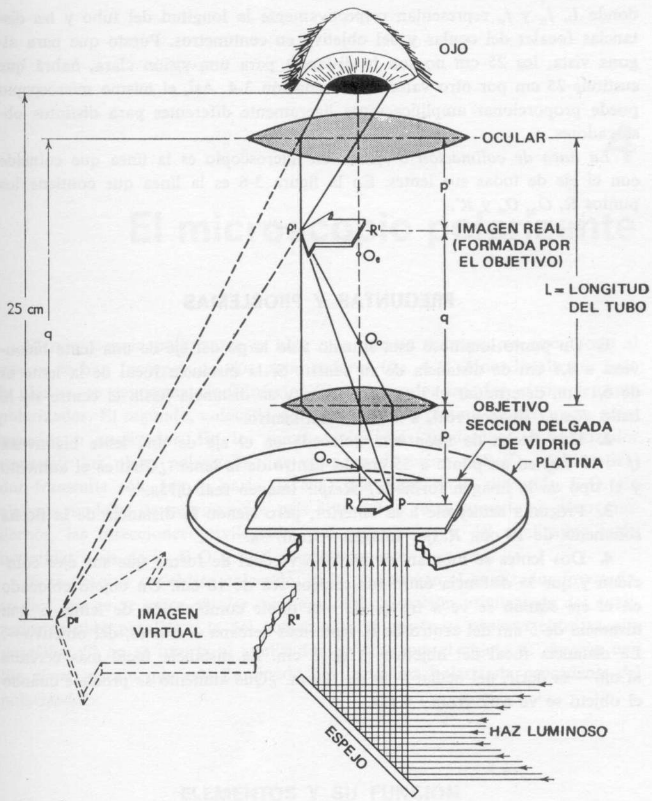



FIGURA 3-6

**Aquí pueden verse los elementos de un microscopio compuesto gracias a una vista perspectiva combinada (platina, objeto RP, imágenes P′R′, y P″R″) y un corte longitudinal (rayos, espejo y lentes). La longitud del tubo óptico, L, ha sido acortada desproporcionadamente con el objeto exclusivo de ilustrarlo con mayor claridad.**

imagen *P″R″* no se ve con claridad, el tubo del microscopio (que contiene el ocular y el objetivo) podrá subirse o bajarse para alterar el valor de $p$ y por tanto de $q$, $p'$ y $q'$ hasta que la imagen virtual esté a 25 cm del ojo.

El poder de amplificación, M.P., de un microscopio compuesto es aproximadamente

$$\text{M.P.} = \frac{25 \text{ cm} \times L}{f_0 \times f_e} \qquad \text{(Ec. 3-4)}$$

donde $L$, $f_0$ y $f_e$ representan respectivamente la longitud del tubo y las distancias focales del ocular y del objetivo en centímetros. Puesto que para alguna vista, los 25 cm no son la distancia para una visión clara, habrá que sustituir 25 cm por otro valor en la ecuación 3-4. Así, el mismo microscopio puede proporcionar amplificaciones ligeramente diferentes para distintos observadores.

*La línea de colimación* o *eje* de un microscopio es la línea que coincide con el eje de todas sus lentes. En la figura 3-6 es la línea que contiene los puntos $R$, $O_0$, $O_e$ y $R'$.

## PREGUNTAS Y PROBLEMAS

**1.** Un punto luminoso está situado a lo largo del eje de una lente biconvexa a 8,1 cm de distancia de su centro. Si la distancia focal de la lente es de 6,1 cm, determinar el tipo de imagen y su distancia hasta el centro de la lente. *Resp.:* Imagen real, a 24,7 cm del centro.

**2.** Una flecha de neón está colocada en el eje de una lente biconvexa ($f = 15$ cm) en un punto a 35 cm del centro de la lente. ¿Cuál es el aumento y el tipo de la imagen formada? *Resp.:* Imagen real 0,75x.

**3.** Pregunta semejante a la anterior, pero siendo la distancia de la flecha solamente de 10 cm. *Resp.:* Imagen virtual, 3x.

**4.** Dos lentes se montan en un tubo vertical de forma que sus ejes coincidan y que la distancia entre sus centros sea de 16 cm. Un objeto colocado en el eje común se ve a través de esta doble combinación de lentes a una distancia de 5 cm del centro de la lente más cercana —esto es, del objetivo—. La distancia focal del objetivo es de 3 cm. La distancia focal más cercana al ojo —es decir, del ocular— es de 12 cm. ¿Qué aumento se produce cuando el objeto se ve así? *Resp.:* 5,15x.

# 4

# El microscopio polarizante

El microscopio polarizante es algo más que un microscopio compuesto al que se le han incorporado dos polarizadores (fig. 4-1). Uno, localizado bajo la platina, se denomina nicol inferior ([1]), polarizador inferior, o simplemente polarizador. El segundo, colocado por encima de la platina, se denomina nicol superior o analizador. En los microscopios más modernos, el polarizador transmite luz plana polarizada que vibra en dirección N-S ([2]), y el analizador transmite sólo luz (o parte de ella) que vibra en la dirección E-O. En algunos modelos de microscopios más antiguos, y relativamente en pocos modernos, las direcciones privilegiadas del polarizador y del analizador están invertidas —es decir, E-O y N-S respectivamente.

Si se observa un objeto colocado en la platina con el analizador insertado, se dice que se ve entre *nicoles cruzados.* Si la dirección privilegiada del analizador se hace paralela a la del polarizador, el objeto se observa entre *nicoles paralelos.* Si no se inserta el analizador, se dice que el objeto se observa con *luz plana,* puesto que está iluminado por luz plana polarizada procedente del polarizador.

## ELEMENTOS Y SU FUNCIÓN

### El espejo que está colocado bajo la platina

El espejo del microscopio suele ajustarse en cualquiera de sus dos ejes, de forma que dirija la mayor cantidad de luz hacia arriba, a lo largo del eje

([1]) Los primeros polarizadores que se usaron en los microscopios fueron inventados por William Nicol y se denominaron prismas de Nicol. El término «nicol» se refiere a cualquiera de los varios tipos de aparatos polarizantes que en la actualidad se usan en los microscopios.

([2]) El convenio de denominar las direcciones del microscopio como puntos de la brújula se debe quizá a que, en los primitivos tiempos del microscopio, era considerada como una buena fuente de luz una ventana orientada al norte. Hoy, por consiguiente, un observador que mire por un microscopio, asume por costumbre el tener el norte a su frente, prescindiendo de su orientación real.

del microscopio. Su cara plana se usa generalmente para aumentos bajos y medios, su cara cóncava para aumentos muy grandes.

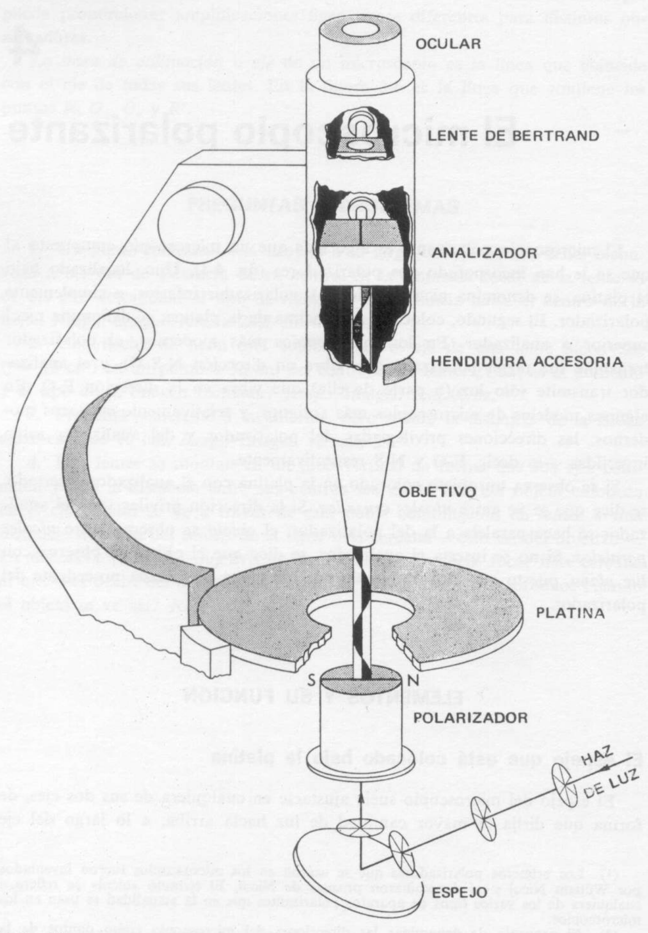



FIGURA 4-1

**Diagrama esquemático de la disposición de las partes más importantes de un microscopio polarizante; los detalles mecánicos se han omitido.**

## Sistema de iluminación

Todo el conjunto situado por debajo de la platina (fig. 4-2) consiste generalmente en un polarizador, un par de lentes condensadoras y un diafragma de iris. El conjunto completo puede ser desplazado hacia arriba o hacia abajo para controlar su distancia por debajo de la platina del microscopio, y asimismo la iluminación del objeto.

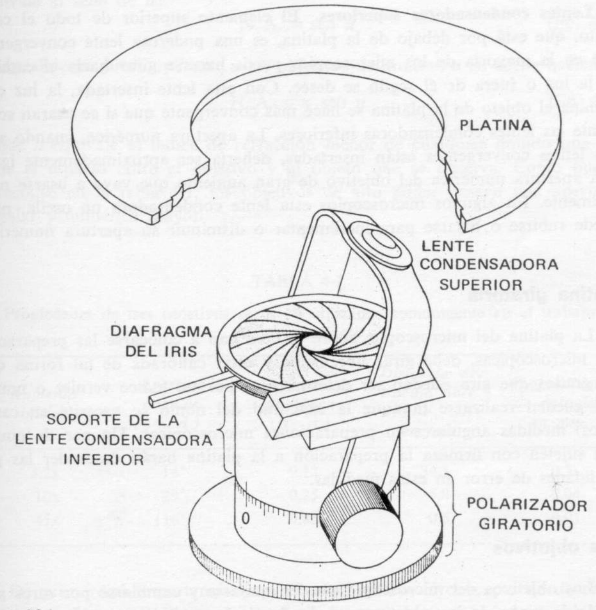



FIGURA 4-2

**Diagrama esquemático del conjunto que está debajo de la platina de un microscopio polarizante representativo; se han omitido los detalles mecánicos.**

**Polarizador.** Como se discutió previamente, el polarizador en su posición normal tiene generalmente como dirección privilegiada la N-S. En muchos modelos, sin embargo, se puede girar el polarizador según su eje vertical. Si vuelve a girarse hasta llegar a su posición normal, producirá un débil «clic» cuando se alcance dicha posición. En esta posición, el índice que indica el grado de rotación del polarizador debería indicar cero (véase fig. 4-2). Si se

comparte un microscopio con otra persona, es conveniente asegurarse de que el polarizador está en posición de cero.

**Lentes condensadoras inferiores.** Estas lentes colocadas directamente por encima del polarizador no pueden ser eliminadas fácilmente del camino de la luz. Su apertura numérica (véase pág. 45) debería ser con preferencia más o menos igual a la del objetivo de mediano aumento del microscopio —que es alrededor de 0,25.

**Diafragma de iris.** Está colocado por encima de las lentes condensadoras inferiores. Su apertura puede aumentarse o disminuirse a voluntad girando una palanca.

**Lentes condensadoras superiores.** El elemento superior de todo el conjunto, que está por debajo de la platina, es una poderosa lente convergente, que en la mayoría de los microscopios puede hacerse girar hacia el camino de la luz o fuera de él según se desee. Con esta lente insertada, la luz que ilumina el objeto de la platina se hace más convergente que si se usaran solamente las lentes condensadoras inferiores. La apertura numérica, cuando ambas lentes convergentes están insertadas, debería ser aproximadamente igual a la apertura numérica del objetivo de gran aumento que vaya a usarse normalmente. En algunos microscopios esta lente condensadora no oscila, pero puede subirse o bajarse para incrementar o disminuir su apertura numérica.

## Platina giratoria

La platina del microscopio, sobre la cual van a colocarse las preparaciones microscópicas, debe girar libremente y estar calibrada de tal forma que los grados que gira puedan ser determinados por un índice vernier o nonio. Así pueden realizarse (aunque la exactitud del nonio se necesite en casos raros) medidas angulares en preparaciones microscópicas. Un par de pinzas que sujeten con firmeza la preparación a la platina harán descender las posibilidades de error en estas medidas.

## Los objetivos

Los objetivos del microscopio pueden quitarse y cambiarse por otros soltando la pinza de los objetivos, el diseño de la cual varía mucho entre los diferentes modelos de microscopios. Generalmente son suficientes, para un trabajo normal, tres objetivos acromáticos para producir aumento (3) bajo (3,2x ó 4x), medio (10x ó 20x), o alto (43x ó 45x) de un objeto. El objetivo de bajo aumento proporciona una buena visión de conjunto de toda la preparación, mientras que los de poder medio y alto dan un detalle mayor de la sección.

Las propiedades características de los objetivos, con las cuales todo estudiante debe familiarizarse, están reunidas en la tabla 4-1 para los tres obje-

(3) Por ejemplo el aumento $P'R'/PR$ producido por el objetivo en la figura 3-6.

tivos acromáticos más comunes que se usan en un trabajo de principiante. Como se ve en la figura 4-3, la apertura angular (A. A.) representa el ángulo entre los rayos más divergentes que pueden entrar en un objetivo desde un punto de un objeto sobre el cual se enfoca el objetivo. El ángulo igual a la mitad de la apertura numérica se denomina $u$:

$$u = \frac{\text{A. A.}}{2}$$

Para los objetivos que no son de inversión la apertura numérica (N. A.) equivale al seno de $u$:

$$\text{N. A.} = \text{sen } u \qquad \text{(Ec. 4-1)}$$

Igualmente puede aplicarse a los objetivos de inmersión en aceite haciendo

$$\text{N. A.} = n \text{ sen } u \qquad \text{(Ec. 4-2)}$$

donde $n$ equivale al índice de refracción menor de cualquier líquido que rellene el espacio entre el objetivo y el objeto que se observa. Como puede apreciarse en la tabla 4-1, los objetivos de alto poder poseen una apertura angular y numérica mayor.

TABLA 4-1

Propiedades de tres objetivos secos ([4]) utilizados comúnmente en el trabajo de un estudiante

| *Aumento inicial* | *Apertura angular (A. A.)* | *Apertura numérica (N. A.)* | *Distancia de trabajo libre (F. W. D.) en mm* | *Profundidad de enfoque en mm* |
|---|---|---|---|---|
| 3,2x | 14° | 0,12 | 34,5 | 0,5 |
| 10x | 29° | 0,25 | 5,8 | 0,04 |
| 45x | 116° | 0,85 | 0,6 | 0,01 |

De primordial importancia para el estudiante es el concepto de distancia de trabajo libre (F.W.D.) que es la distancia entre la parte más baja del objetivo (en muchos casos un anillo protector de metal) y la parte más alta del cubreobjetos de vidrio al cual se enfoca. Como puede verse en la figura 4-3, la distancia libre de trabajo es ordinariamente muy pequeña para los objetivos de alto poder; por tanto, mejor que mirar a través del ocular, el estudiante debe observar (cuando su ojo esté al nivel de la platina) el espacio de aire que queda entre el objetivo y la preparación cuando el microscopio se

([4]) Los objetivos ordinarios, que están separados del objeto que se observa por el aire, se denominan objetivos «secos». Esto es para contrastarlos con los objetivos de inmersión en aceite de gran poder de amplificación, en los cuales un aceite de inmersión rellena el espacio entre el objetivo y el objeto a observar.

desplaza hacia abajo. Cuando el espacio aéreo es ligeramente menor que la distancia de trabajo libre, puede mirar a través de ocular y *elevar* el microscopio lentamente hasta que logre el enfoque. *Si no se efectúa esta operación con precaución puede producirse un perjuicio considerable al objeto o al objetivo.*

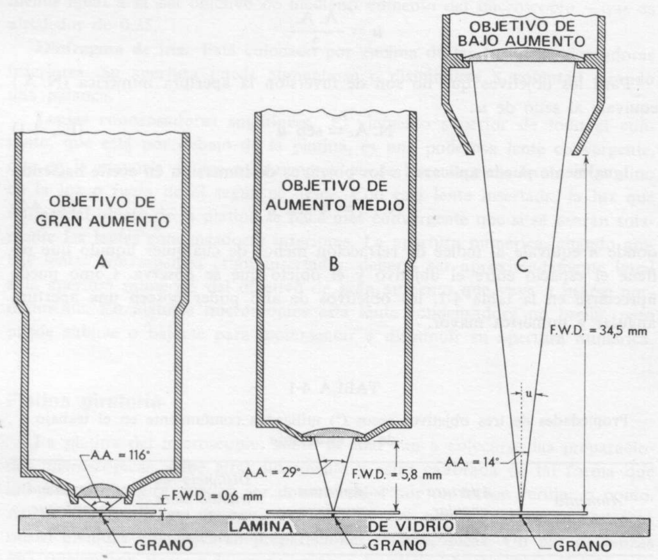



FIGURA 4-3

**Comparación de las tres distancias libres de trabajo (F.W.D.), aperturas angulares (A.A.) y la mitad de la apertura angular (u) para los objetivos que se describen en la tabla 4-1.**

En algunas preparaciones, el espesor del cubreobjetos es superior a 0,16-0,18 mm, grosor preferente, de forma que la distancia de trabajo libre es menor que cero para un objetivo de gran poder y, por consiguiente, la sección no puede enfocarse con claridad. Generalmente, sin embargo, cuando tal dificultad acontece para una sección delgada petrográfica, el estudiante principiante descubre que la sección delgada ha sido colocada boca abajo —es decir, con el cubreobjetos hacia abajo— en la platina del microscopio. Si el cubreobjetos de vidrio es realmente muy grueso, el estudiante debe utilizar un objetivo de bajo poder.

Un objetivo que se inserta en un microscopio puede producir imágenes de débil contorno de puntos que están por encima y por debajo del punto preciso que se enfoca. El *poder de enfoque en profundidad,* la distancia entre

el límite superior e inferior (fig. 4-4), es una función inversa de la apertura numérica; los objetivos con gran apertura numérica tienen generalmente distancias de enfoque más pequeñas y viceversa.

La importancia de esta característica en microscopía se hará patente si uno enfoca un cubo de vidrio en cuyo interior hay diseminadas partículas de polvo, con un microscopio equipado con los tres objetivos descritos en la tabla 4-1 y con un ocular 10x. Usando el objetivo de 0,12 N. A., todas las inclusiones que estén aproximadamente a 0,25 mm por encima o por debajo del centro del cubo (fig. 4-4A) estarán bastante enfocadas, mientras que con

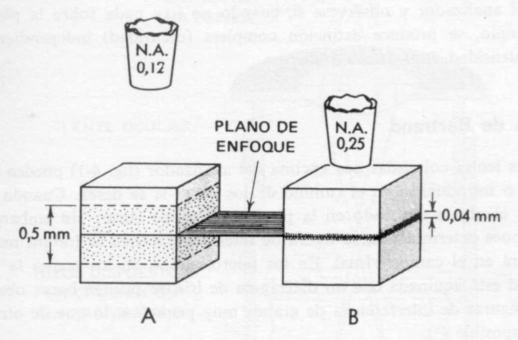



FIGURA 4-4

**Comparación de la profundidad de enfoque para (A) un objetivo de poco aumento de N.A. = 0,12 y (B) un objetivo de aumento medio con N.A. = 0,25. El punteado representa las partículas de polvo en el cubo de vidrio que están enfocadas si el objetivo se enfoca precisamente sobre el nivel del plano rayado.**

el objetivo 0,25 N. A. sólo serán claramente visibles las inclusiones que se encuentren aproximadamente 0,02 mm por encima o debajo de este punto central (fig. 4-4B). El objetivo de alto poder (0,85 N.A.) confina prácticamente la visibilidad a un plano situado en el objeto que se enfoca. Por consiguiente, al estudiar cristales mayores de 0,01 mm de espesor con un objetivo de alto poder, es necesario enfocar hacia arriba y hacia abajo para observar el cristal verticalmente y poder apreciar características que de otra forma no serían visibles.

## Hendidura accesoria

Una hendidura colocada en el extremo inferior del tubo del microscopio (véase fig. 4-1) permite la intercalación, en el camino de la luz, de uno de los tres accesorios comúnmente usados (cuña de cuarzo, lámina de λ y lámina de 1/4 λ). La teoría y la utilidad de estos tres accesorios se discutirán en el siguiente capítulo.

## Analizador

Como ya hemos dicho, el elemento polarizante situado sobre la hendidura accesoria (fig. 4-1) se denomina analizador, y, por lo tanto, es fácilmente retirable del camino de la luz. En algunos modelos de microscopios, la dirección privilegiada del analizador puede ser girada 90°. Sin embargo, para la mayoría de operaciones es conveniente que la dirección privilegiada del analizador forme un ángulo de 90° con la del polarizador; para verificarlo, colóquese el analizador y obsérvese si, cuando no hay nada sobre la platina del microscopio, se produce extinción completa (oscuridad) independientemente de la intensidad de la fuente luminosa.

## Lentes de Bertrand

Estas lentes colocadas por encima del analizador (fig. 4-1) pueden también sacarse o introducirse en el camino de los rayos si se desea. Cuando está insertada, el objeto enfocado en la platina no puede verse; sin embargo, bajo condiciones determinadas, su figura de interferencia (que se tratará más tarde) aparecerá en el campo visual. En los microscopios, en los cuales la lente de Bertrand está equipada con un diafragma de iris, se pueden hacer observaciones de figuras de interferencia de granos muy pequeños, lo que de otra forma sería imposible ([5]).

## Ocular

Son suficientes, para el microscopio ordinario, un par de oculares (tipo Huygens) negativos de 5x y 10x o bien de 6x y 12x. En términos generales, los oculares de mayor aumento que 12x, aunque se usen en conjunción con objetivos de muy alta calidad, no proporcionan imágenes satisfactorias. Para microfotografía, es también aconsejable un ocular positivo (tipo Ramsden) de aumento intermedio. Si un observador considera necesario utilizar gafas para observar al microscopio, se preferirán oculares de poder bajo ya que la posición donde el ojo ve el campo de visión entero —es decir, el espacio denominado «salida pupilar» en la figura 4-5A— está por encima de la lente del ojo para oculares de pequeño aumento. Para algunos oculares de gran aumento, la salida pupilar puede estar tan cerca de la lente del ojo como para impedir las observaciones a aquellos que lleven gafas.

Un ocular negativo (fig. 4-5A) está formado por dos lentes. La lente inferior (lente del campo) incrementa la convergencia de los rayos de luz que proceden del objetivo, de forma que la imagen real se forma en *P'R'* en lugar

([5]) El ocular universal diseñado por F. E. Wright, es muy adecuado para la observación de figuras de interferencias de granos pequeños, pero no se usa generalmente para trabajos de iniciación.

de en $P''R''$. Un diafragma fijo que limita el campo de visión se coloca precisamente en el plano que contiene la imagen real $P'R'$. Se pueden montar en este diafragma fijo un par de cabellos (hilos, en algunos casos de araña) cruzados perpendicularmente entre sí, de forma que aparezcan en el campo de visión como dos líneas negras perpendiculares entre sí. Además de estos hilos

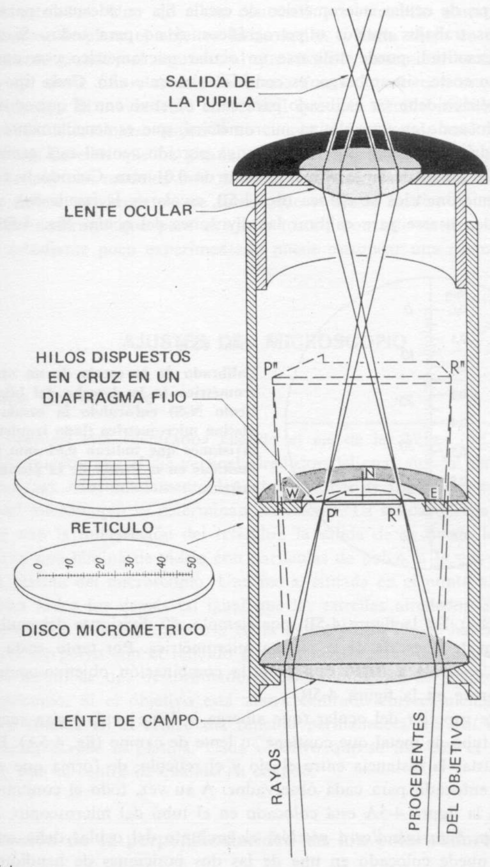



FIGURA 4-5 A

**Componentes y rayos luminosos en un ocular negativo (Huygeniano). Las líneas discontinuas representan la trayectoria de los rayos y la localización de la imagen real si se quitara la lente de campo.**

de araña, puede montarse en el diafragma fijo un delgado disco de vidrio sobre cuya superficie estén dibujadas un par de líneas finas perpendiculares entre sí para sustituir los cabellos. Para hacer medidas cuantitativas lineales de granos minerales que se vayan a observar, puede colocarse en lugar de cabellos perpendiculares un retículo o un disco micrométrico (fig. 4-5A). Tales oculares, denominados oculares micrométricos, pueden adquirirse en el comercio. Este tipo de ocular micrométrico de escala fija es adecuado para la mayoría de los trabajos ópticos o petrográficos, si no para todos. Si se desea una gran exactitud, puede utilizarse un ocular micrométrico con una escala movible; su coste, sin embargo, es considerablemente alto. Cada tipo de ocular micrométrico debe ser calibrado para cada objetivo con el que se use. Esto se hace enfocando en una platina micrométrica, que es sencillamente una lámina de vidrio de 7,5 cm por 2,5 cm, cuya porción central está grabada con una línea de 2 mm de largo con intervalos de 0,01 mm. Cuando la escala de la platina micrométrica se enfoca (fig. 4-5B, escala de la izquierda), sus divisiones pueden usarse para calibrar las divisiones del ocular (fig. 4-5B, escala

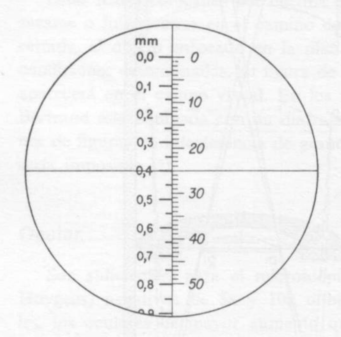



FIGURA 4-5 B

**Calibrado de la escala de un ocular micrométrico (a la derecha del hilo del retículo N-S) enfocando la escala de una platina micrométrica (lado izquierdo). Las divisiones que indican 0,01 mm han sido omitidas en la escala de la platina micrométrica.**

de la derecha). En la figura 4-5B, por ejemplo, 50 divisiones del ocular abarcan 0,8 mm de la escala de la platina micrométrica. Por tanto, cada división del ocular equivale a 0,016 mm para la combinación objetivo-ocular, cuyo campo aparece en la figura 4-5B.

La parte superior del ocular (que alberga la lente ocular) gira suavemente dentro del tubo de metal que contiene su lente de campo (fig. 4-5A). Este giro permite ajustar la distancia entre el ojo y el retículo, de forma que este último quede enfocado para cada observador. A su vez, todo el conjunto representado en la figura 4-5A está colocado en el tubo del microscopio. Durante su inserción, *bajo una ligera presión,* el conjunto del ocular debe ser girado hasta que quede colocado en una de las dos posiciones de hendidura. Una vez colocado en una de ellas, debe de ser levantado ligeramente antes de girarse hacia la segunda posición. El retículo, en una de estas posiciones, quedará colocado NS-EO. En la segunda estarí a 45° de ésta.

## Ajustes tosco y fino

La altura de un objetivo por encima de un objeto que está en la platina del microscopio, puede variarse ocasionalmente para obtener una imagen con los contornos enfocados. Esto se realiza generalmente con la ayuda de dos tornillos estriados. Uno de ellos, conocido por «tornillo macrométrico de ajuste tosco», desplaza el objetivo hacia arriba o hacia abajo en un intervalo notablemente grande; el segundo, al que se suele denominar «tornillo micrométrico de ajuste fino», realiza la misma función pero con unos intervalos muy graduales. El movimiento en vertical que este tornillo micrométrico produce, puede determinarse teniendo en cuenta el número de vueltas completas o fracciones de ellas que ha girado el tambor, por medio de su tambor calibrado. En algunos modelos más modernos, un solo tornillo de control puede realizar ambos movimientos, de forma que el ajuste fino se obtenga girando en sentido contrario que para el ajuste tosco; con este sistema, por desgracia, un estudiante poco experimentado puede estropear una preparación.

# AJUSTES DEL MICROSCOPIO

## Centrado del objetivo

Un objetivo está «centrado» cuando el eje de las lentes (*bo* en la figura 4-6A) coincide con el eje vertical alrededor del cual gira la platina del microscopio (*sa*). Afortunadamente, las intersecciones de ambos ejes con el campo visual del microscopio se determinan fácilmente. La salida del eje *bo* siempre coincide con la intersección del retículo; la salida de *sa* puede localizarse si se observa una lámina de vidrio con partículas de polvo, a la vez que se hace girar la platina del microscopio. Una mota, situada en el punto alrededor del cual giran todos los demás (al igual que las estrellas alrededor de la estrella polar) marca la salida *sa* (punto *a* en la figura 4-6B). Puede hacerse coincidir esta mota de polvo con el retículo girando los tornillos de centraje del objetivo por medio de dos destornilladores centradores que se proporcionan con el microscopio. Si el objetivo está ahora centrado correctamente, una mota de polvo situada en el centro del retículo permanecerá fija allí durante una vuelta completa de la platina. Cada objetivo que se use con el microscopio requiere que se centre de cuando en cuando.

## Verificación de la perpendicularidad de los polarizadores

Ajustar el espejo inferior y abrir el iris del diafragma hasta la máxima iluminación del campo visual. Si ahora se inserta el analizador, el campo debe estar completamente oscuro; si no está oscuro, los polarizadores no están

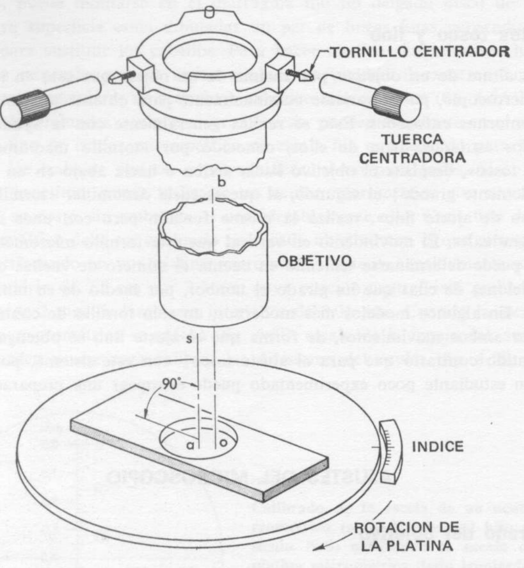



FIGURA 4-6 A

**Objetivo descentrado. Se han eliminado todas las partes del microscopio excepto la platina y el objetivo. El eje de la lente, bo, y el eje vertical en torno al cual gira la platina, sa, no coinciden, por tanto el objetivo está descentrado.**

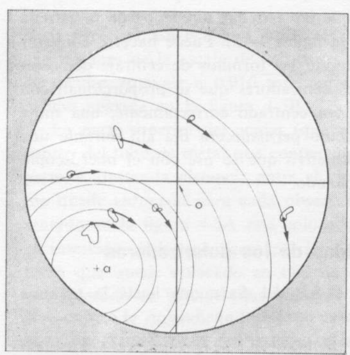



FIGURA 4-6 B

**Campo del microscopio donde se puede apreciar el movimiento de las partículas en una lámina de vidrio que se ha girado en la figura 4-6 A. Las partículas forman círculos alrededor de un punto, a, que marca la salida del eje, sa, en el campo.**

perpendiculares entre sí. Si esto ocurriese, debe comprobarse si el polarizador se ha ajustado (véase pág. 43) en su posición normal; y en el caso de microscopios con analizador giratorio, si el analizador está en la posición cero. Con ambos polarizadores en la posición cero, debe existir una perpendicularidad exacta entre sus direcciones privilegiadas, situación que se conoce con el nombre de «nicoles cruzados».

## Alineación de los hilos del retículo con los nicoles

Durante las medidas corrientes, los hilos del retículo deben ser paralelos a las direcciones privilegiadas de los nicoles. Este paralelismo puede ser probado observando, entre los nicoles cruzados, una preparación en aceite (véase página 74) que contenga agujas de $PbCl_2$, $HgCl_2$ o de natrolita. Si se desea que exista paralelismo, las agujas deben aparecer oscuras cuando se disponen

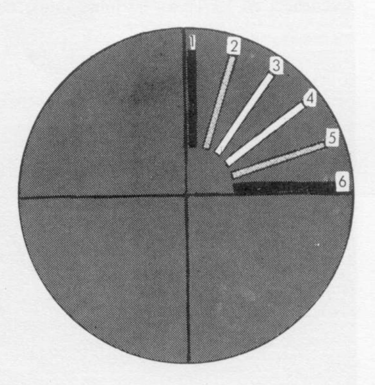



FIGURA 4-7

**Giro de una aguja de $PbCl_2$, $HgCl_2$, o de natrolita en las posiciones sucesivas de 1 a 6 entre nicoles cruzados. El microscopio que se ha usado en este caso tiene ajustado el retículo con los nicoles, puesto que la aguja está paralela al hilo cuando su extinción es máxima (posiciones 1 y 6).**

paralelas a uno de los hilos del retículo (fig. 4-7). Si no existe paralelismo, es probablemente porque 1) uno de los polarizadores no está en posición cero, o 2) porque el ocular no está introducido en la posición de las muescas.

## Limpieza de las lentes

Solamente se formarán imágenes claras si las superficies del vidrio del microscopio están libres de huellas dactilares y de las partículas de polvo que algunas veces se adhieren al vidrio. Para limpiar una lente, cepíllese primero con una brochita suave de pelos de camello, para eliminar cualquier partícula de polvo abrasiva, luego frótese con un suave paño empapado en xileno. Sáquese luego el brillo a las lentes con un paño seco limpio. Puesto que el ocular y el objetivo se manejan con relativa frecuencia, es más fácil que se ensucien con las huellas dactilares, y debe comprobarse, por tanto, si las imá-

genes del microscopio están turbias. El vidrio de la preparación en que se monta el objeto debe estar también sin gotitas de aceite, suciedades y huellas dactilares. Para limpiar las preparaciones puede utilizarse un tejido menos caro que el de las lentes. Para lentes, sin embargo, úsese solamente un tejido adecuado para lentes, libre de abrasivos.

## MICROSCOPIOS POLARIZANTES MODERNOS

El microscopio polarizante es uno de los más poderosos instrumentos de trabajo del geólogo, mineralogista o químico. El estudiante debe por tanto familiarizarse con el nombre, la función y los ajustes rutinarios de cada pieza importante del microscopio que se le asigne. Para ayudar a esto se han incluido fotografías de los microscopios polarizantes que se utilizan con mayor frecuencia en las clases de mineralogía (figs. 4-8 a 4-13).

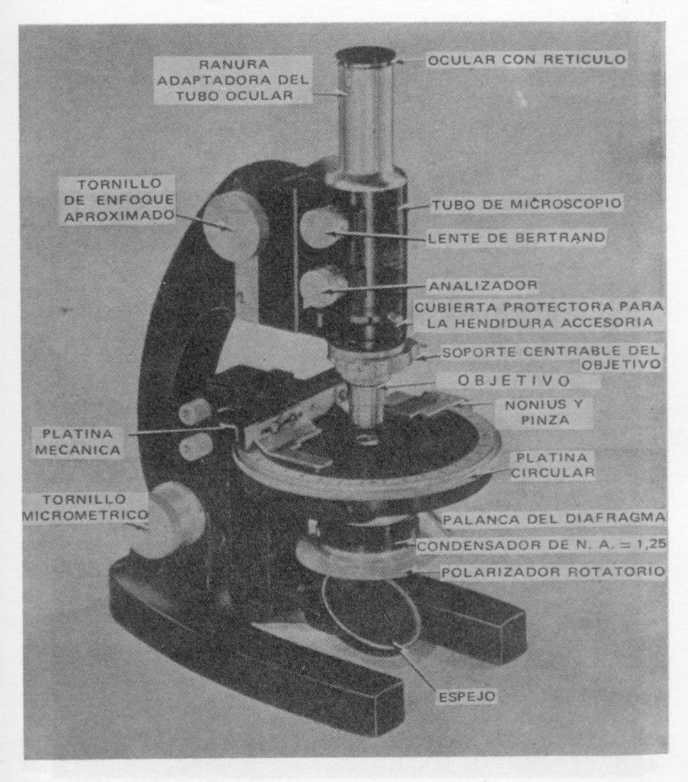



FIGURA 4-8

**Microscopio polarizante modelo LI de la Compañía Óptica Bausch y Lomb (Rochester 2, Nueva York). El condensador puede desplazarse verticalmente hacia arriba y hacia abajo cuando se desea incrementar la convergencia de la luz.**

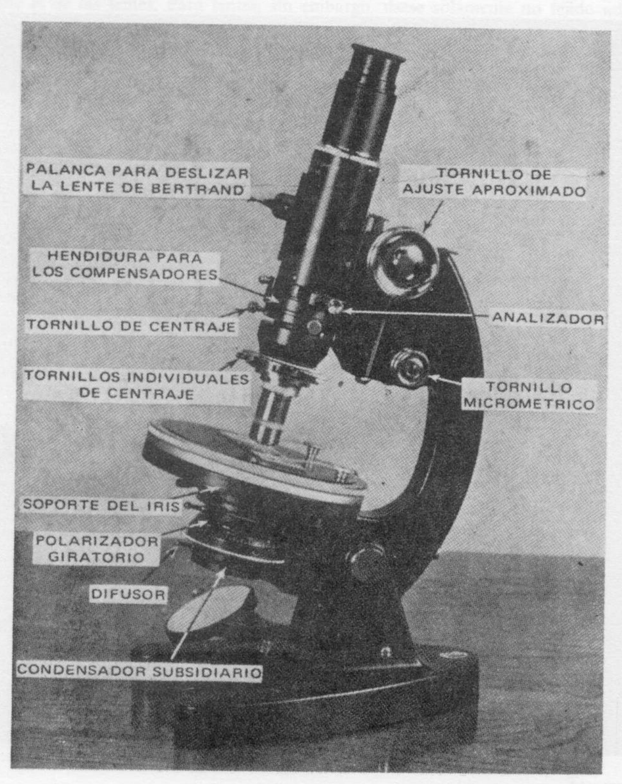



FIGURA 4-9

**Microscopio polarizante modelo M7110Q de Cooke, Troughton, y Simms, Inc. (91, Waite Street, Malden 48, Massachusetts). Descrito en el** Mineralogical Magazine **(1946 págs. 175-185).**

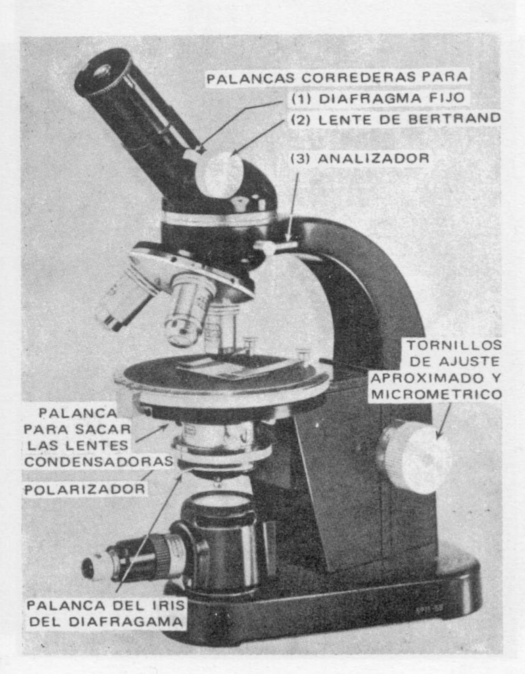



FIGURA 4-10

**Microscopio polarizante modelo SM-Pol de E. Leitz Inc. (468 Park Avenue South, Nueva York 16, Nueva York.)**

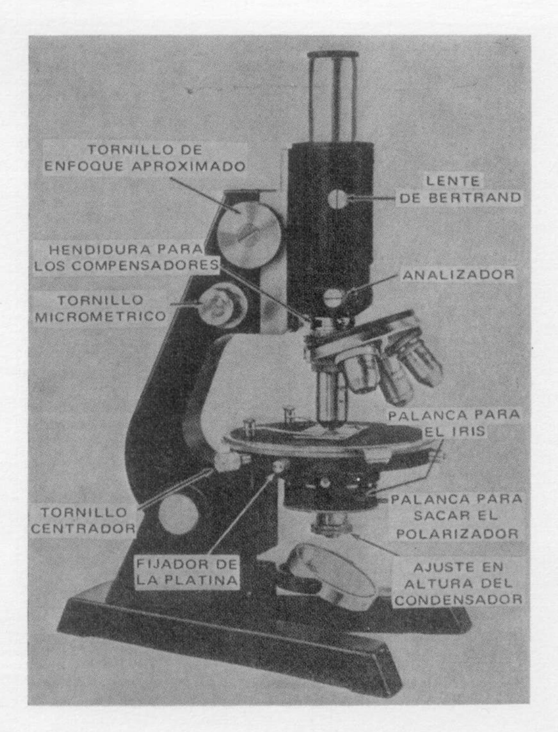



FIGURA 4-11

**Microscopio polarizante Modelo RCP de la C. Reichert Optische Werke A. G. (Hernalser Hauptstrasse 219, Viena XVII, Austria.)**

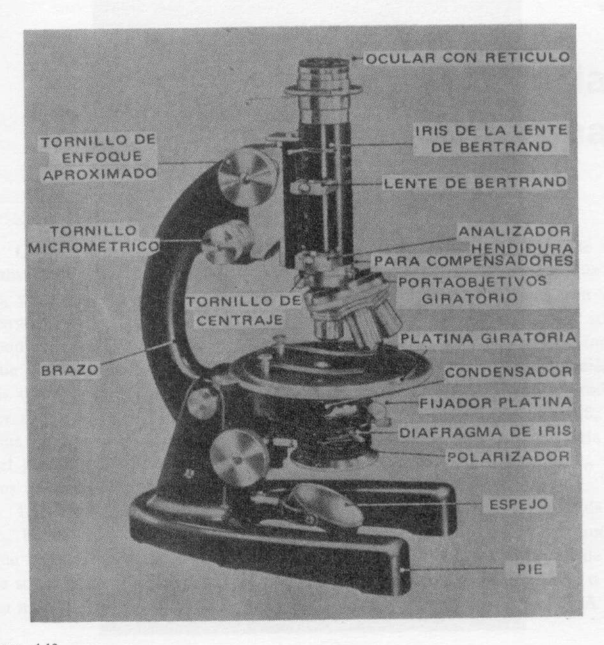



FIGURA 4-12

**Microscopio polarizante Modelo P de James Swift and Son Limited (113-115A Camberwell Road, Londres S. E. 5).**

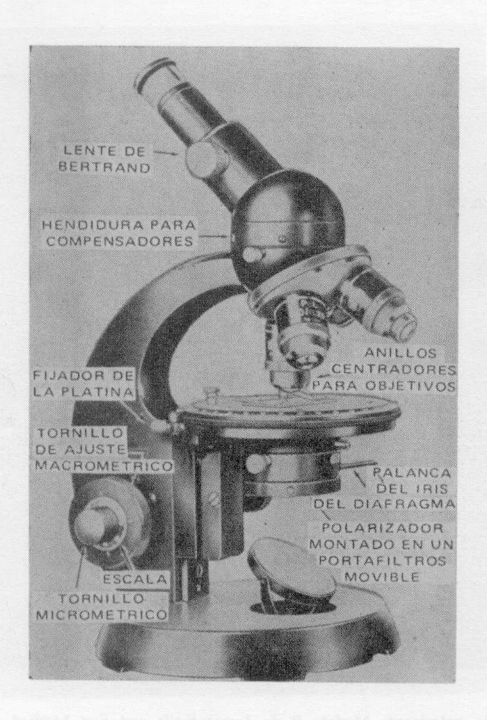



FIGURA 4-13

**Microscopio polarizante Modelo KFT Standard Junior Pol de Carl Zeiss, Inc. (485 Fifth Avenue, Nueva York 17, Nueva York).**

# 5

# Examen óptico de substancias isótropas

Como ya se ha discutido anteriormente, el índice de refracción de una substancia varía para luces de diferente longitud de onda; de aquí que $n_C$, $n_D$ y $n_F$ pueden ser medidos en estudios detallados. Comúnmente, sin embargo, el único índice que se mide es $n_D$ o $n$; $n_D$ indica que fue luz de sodio monocromática la que se empleó durante la medida, mientras que $n$ indica que la iluminación durante la medida se hizo con luz blanca. Cualquiera de las dos medidas puede bastar para identificar un mineral, aunque $n$ tiende a ser menos exacto. Sin embargo, de acuerdo con Emmons y Gates (1948, página 612), si los colores en que queda dispersada la luz blanca en cada eje del grano se interpretan con propiedad, los valores de $n$ difieren de $n_D$ menos de ± 0,002.

Las discusiones que seguirán se centrarán, por tanto, en la medida de $n_D$, bien directamente o indirectamente como $n$. Tácitamente se comprenderá que $n_C$ o $n_F$ pueden ser medidos en vez de $n_D$ si se sustituye la fuente de luz de sodio por un tubo de descarga de hidrógeno adecuadamente filtrado, o por un monocromador que emita longitudes de onda de 6563 Å (C) ó 4861 Å (F).

## MEDIDA DEL ÍNDICE DE REFRACCIÓN EN LÍQUIDOS

El refractómetro de Abbe es el instrumento tipo para la medida del $n_D$ de los líquidos. Según el modelo, el intervalo de índices de refracción que se pueden medir puede ser de 1,30 a 1,71, o de 1,45 a 1,84 con una precisión de ± 0,0002. Una lámpara de vapor de sodio o un monocromador para luz de 5893 Å es el método de iluminación más empleado. También puede usarse el microrrefractómetro de Jelly, menos costoso, para determinar los índices de un líquido (en el intervalo de 1,33 a 1,92 y con una precisión de ± 0,001). Ambos métodos son rápidos y aceptables. Existen numerosos métodos para medir el índice de refracción en los líquidos; en general, sin embargo, el in-

cremento de precisión va unido a un mayor empleo de tiempo. N. Bauer (Weissberger, 1949, tabla X, pág. 1238) contabiliza el tiempo que se requiere y el máximo de precisión que se alcanza en diversos métodos. Fisher (1958) recomienda el uso de una mínima cantidad de aceite, con el fin de hacer mayor la precisión durante el calibrado del refractómetro de Abbe, con las placas de índices conocidos.

## MEDIDA DEL ÍNDICE DE REFRACCIÓN EN LOS SÓLIDOS

### Método del Duque de Chaulnes

Este método permite la medida del índice de refracción de placas transparentes con sólo una aproximación pequeña. Lo hemos incluido aquí, de forma concisa, para poner de manifiesto las relaciones inversas entre el índice de una placa transparente y su espesor aparente. Este último valor representa el espesor aparente que hay entre las superficies inferior y superior de la placa vista verticalmente. Los pasos que hay que seguir son: 1) enfóquese un objetivo de mediano aumento (N. A. 0,25) sobre la superficie superior de la lámina de vidrio que está colocada en la platina del microscopio (fig. 5-1A); 2) colóquese con cuidado la placa de índice desconocido sobre la lámina de cristal y levántese el tubo (usando sólo el tornillo micrométrico) hasta que la superficie de la placa desconocida quede enfocada (fig. 5-1B) —la diferencia entre

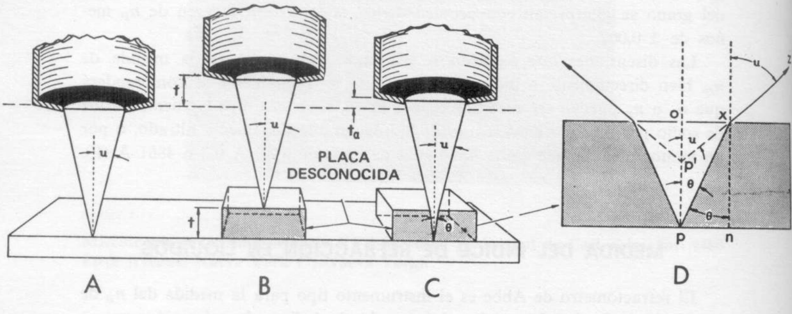



FIGURA 5-1

**Los tres pasos a seguir según el método del Duque de Chaulnes para la medida del índice de refracción de una placa de vidrio desconocida. (A) Enfoque en la superficie de la placa; (B) enfoque en la superficie superior de la placa desconocida; (C) enfoque en la superficie de la placa** a través **del material desconocido. En (D) puede verse una porción de (C), los rayos de luz en el aire (xz, etc.), parece ser que proceden de un punto p′ aunque en realidad provienen del punto p. Así, op′ parece ser el espesor de la placa medido por medio del enfoque a través de ella. Los ángulos $\theta$ y u se han exagerado para mayor claridad.**

esta segunda lectura en la escala del tornillo y la que se obtuvo en el paso 1) nos da $t$, el espesor verdadero de la placa desconocida; 3) ahora, enfóquese con cuidado hacia abajo a través de la placa desconocida hasta alcanzar la superficie superior de la lámina de vidrio (fig. 5-1C) —la diferencia entre la nueva lectura y la obtenida en 1) es el espesor aparente $t_a$, de la placa desconocida.

La ecuación del Duque de Chaulnes para el índice de refracción de la placa desconocida es

$$n = \frac{t}{t_a} \qquad \text{(Ec. 5-1)}$$

donde $t$ y $t_a$ significan respectivamente los espesores verdadero y aparente. Las lecturas diferentes en la escala del tornillo micrométrico que se obtienen en las operaciones 2 y 3, anteriormente citadas, son respectivamente proporcionales a $t$ y $t_a$ y pueden sustituirse directamente en la ecuación 5-1 para obtener el índice de refracción de la placa desconocida.

La derivada de la ecuación 5-1, siguiendo la figura 5-1D, es la siguiente:

$$\operatorname{tg} u = \frac{ox}{op'} \quad \text{y} \quad \operatorname{tg} \theta = \frac{ox}{op}$$

pero $op'$ y $op$ son iguales respectivamente a $t_a$ y $t$; así

$$\frac{\operatorname{tg} u}{\operatorname{tg} \theta} = \frac{op}{op'} = \frac{t}{t_a}$$

Sin embargo, puesto que los rayos $px$ y $xz$ obedecen a la ley de Snell,

$$n = \frac{\operatorname{sen} u}{\operatorname{sen} \theta}$$

En ángulos pequeños la relación de sus senos es aproximadamente igual que la de las tangentes; por consiguiente

$$n = \frac{\operatorname{sen} u}{\operatorname{sen} \theta} \cong \frac{\operatorname{tg} u}{\operatorname{tg} \theta} = \frac{t}{t_a}$$

## Métodos de inmersión

Uno de los métodos de medida de índice de refracción más adecuado para sólidos transparentes es el de inmersión de fragmentos del mismo, en una serie de líquidos de índice de refracción conocido. Los criterios, que se discutirán en las siguientes secciones, pueden aplicarse para determinar si el índice de refracción de los fragmentos de cristales se aproxima en 0,002 ó 0,003 al índice del líquido que los rodea. Los líquidos de inmersión que se emplean deben, como mínimo, variar entre 1,430 y 1,470, con intervalos de 0,004 ó 0,005. Tales series de medios de inmersión se obtienen en el comercio, o bien pueden prepararse en el laboratorio. Un folleto, que puede obtenerse

por separado de este libro, indica tanto las fuentes de series de líquidos ya preparados en el comercio como los datos necesarios para prepararlos si así se desea.

**Relieve.** La profundidad de las sombras a lo largo de los bordes de un grano —o lo que es igual, el grado de relieve— indica de forma grosera la aproximación que hay entre el valor del índice del grano y el del aceite. Al ser casi iguales, el grano se aprecia con poco o nada de relieve si se ve inmerso en el aceite; es casi completamente invisible (fig. 5-2A). A medida que la diferencia entre los índices de refracción se va haciendo cada vez mucho

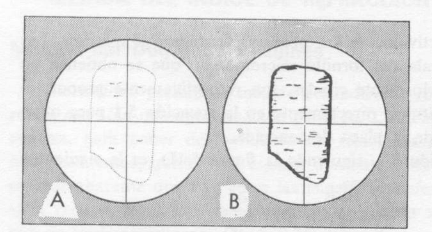



FIGURA 5-2

**Relieve débil (A) y relieve fuerte (B), de un grano sumergido en aceite.**

mayor, el relieve pasa de bajo, a moderado, a alto y, por último, a extremadamente alto. El relieve muy alto (fig. 5-2B) se caracteriza por la presencia de sombras pronunciadas en las superficies de los granos. Los efectos de sombra que hacen aparecer al grano como en relieve sobre la superficie de aceite pueden deberse a que: 1) el índice del grano es menor que el del aceite (relieve negativo), o 2) a que su índice es mayor que el del aceite (relieve positivo). Por desgracia, no pueden distinguirse el relieve positivo del negativo en una observación de rutina.

**Método de la línea de Becke** (1). Un grano que esté sumergido en aceite, al verse al microscopio, enfocado ligeramente por encima de su posición de enfoque correcta, presenta, por lo general, dos líneas (una oscura y otra brillante), que son concéntricas con el borde. La más brillante de ambas líneas está más cerca del material que tiene el índice de refracción mayor (fig. 5-3, $F_2F_2$ campo del microscopio) y por tanto (como se ve en los campos $F_2F_2$ marcado por las flechas gruesas), *siempre se desplaza cuando se mueve el microscopio por encima de la posición de enfoque hacia el medio que tiene mayor índice de refracción* —es decir, desde un foco en el plano $F_1F_1$ al $F_2F_2$. Esta línea, que representa una concentración de luz como efecto de la reflexión o la refracción, o ambas, en los límites del grano, se llama en muchos trabajos simplemente línea de Becke. Sin embargo, en el presente trabajo se denominará línea brillante de Becke para distinguirla en algunas ocasiones de la compañera oscura, que aquí llamaremos línea oscura de Becke. Las líneas de Becke se hacen más patentes si se cierra el iris del diafragma situado bajo la platina.

(1) A veces denominado método de iluminación central.

A. INDICE DEL GRANO MAYOR QUE EL DEL ACEITE

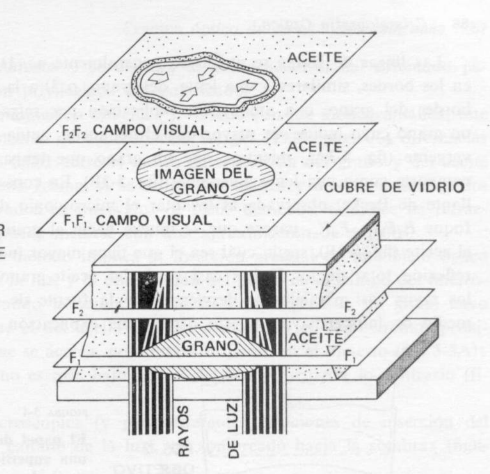
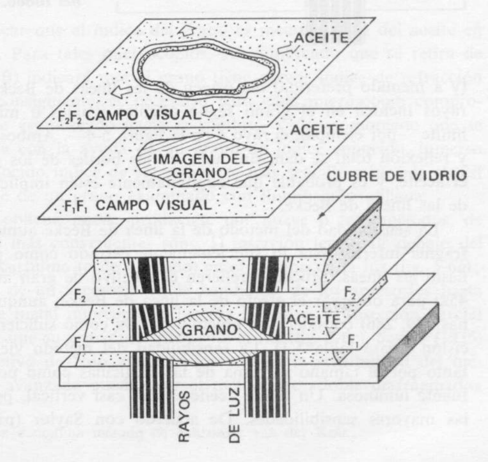



FIGURA 5-3

**Disposición y movimiento de las líneas de Becke. El campo visual $F_1F_1$ es el que se observa en el microscopio cuando éste se enfoca sobre el plano $F_1F_1$ para producir una imagen neta del grano; aquí las líneas de Becke no son muy patentes. Sin embargo, si se observa mientras se levanta el tubo del microscopio hasta enfocar un plano $F_2F_2$, las líneas de Becke se hacen mucho más aparentes, moviéndose la más brillante (como indican las flechas gruesas en el campo $F_2F_2$) hacia el medio de mayor índice de refracción. Las secciones del grano muestran las «coronas oscuras y brillantes» que se producen por dispersión, que aparecen sobre los límites grano-aceite y dan lugar a los efectos de la línea de Becke. Las coronas oscuras y brillantes cambian de posición de acuerdo con el mayor (A) o menor (B) índice del grano con relación al aceite.**

B. INDICE DEL GRANO MENOR QUE EL DEL ACEITE



Las líneas de Becke se atribuyen generalmente a: 1) refracción de la luz en los bordes, similares a una lente, del grano, o 2) a la reflexión total en los bordes del grano, o a ambos. Su explicación por refracción presupone que un grano cuyo índice sea mayor que el del aceite, actúa como una lente convergente (fig. 5-3A), mientras que un grano que tenga el índice menor, se comporta como una lente divergente (fig. 5-3B). En consecuencia, la línea brillante de Becke, observada al levantar el microscopio de la posición de enfoque $F_1F_1$ a $F_2F_2$, parece que se mueve hacia el grano (fig. 5-3A), o hacia el aceite (fig. 5-3B), según cuál sea el que tiene mayor índice de refracción. La reflexión total de los límites casi verticales aceite-grano (fig. 5-4), hace que los rayos casi paralelos se desvíen desde la fuente de iluminación hacia el medio de índice mayor, y esto ofrece una explicación igualmente plausible

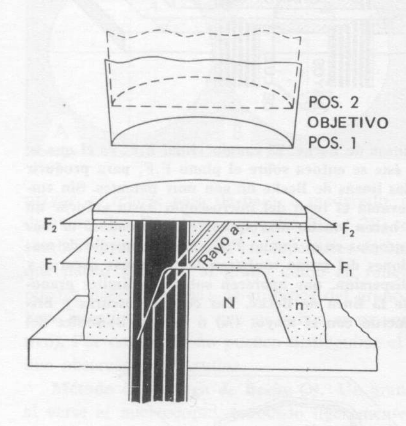



FIGURA 5-4

**El papel de la reflexión total, en una superficie de separación casi vertical, como causante del efecto de las líneas de Becke. Al elevar el objetivo de su foco en el plano $F_1F_1$, a un foco en el plano $F_2F_2$ (es decir de la posición 1 a la posición 2), la línea de Becke se mueve hacia el centro del grano, puesto que, en este caso, el grano tiene un índice más alto (N), que el aceite (n). Para simplificar, se han omitido los rayos luminosos de la mitad derecha del grano y del fondo.**

(y a menudo preferida) del origen de las líneas de Becke. Nótese que ciertos rayos inciden en el grano según ángulos iguales o mayores que el ángulo límite —por ejemplo, el rayo *a* en la figura 5-4—. Ambos efectos de refracción y reflexión total se dan, sin duda, en los bordes de los granos sumergidos en el aceite, y es probable que conjuntamente estén implicados en el desarrollo de las líneas de Becke.

La sensibilidad del método de la línea de Becke aumenta si el iris del diafragma inferior está lo suficientemente cerrado como para poner de manifiesto las líneas. Muchos prefieren el objetivo de gran aumento (alrededor de 45x) para observar el efecto de la línea de Becke, aunque Saylor (1935, páginas 279, 286) considera un objetivo de 10x como suficiente para permitir precisión (véase tabla 5-1). La sensibilidad del método viene también afectada, tanto por el tamaño y forma de las partículas como por la intensidad de la fuente luminosa. Un límite aceite-cristal, casi vertical, permite por lo general las mayores sensibilidades. De acuerdo con Saylor (pág. 294), se obtienen

resultados más ventajosos si se observa el límite aceite-cristal orientado paralelo a la dirección privilegiada del polarizador.

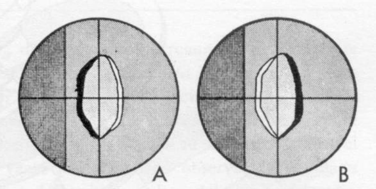
**Método de la iluminación oblicua** ([2]). Usado con luz monocromática, este método permite detectar de acuerdo con Wright (1913, pág. 76) diferencias tan pequeñas como 0,001 entre el índice de refracción del grano y del aceite que lo rodea. De esta forma, si se utiliza luz blanca y una serie de líquidos de inmersión calibrados en intervalos de 0,005 o menos, el índice de refracción de un grano puede medirse con una aproximación de ± 0,003.

En esencia, este método implica la inserción gradual de un objeto opaco en la trayectoria de la luz, y la observación del grano en el campo del microscopio al irse acercando la sombra hacia él. Por lo general, un grano cuyo índice es mayor que el del aceite quedará sombreado en los extremos próximos a la sombra que se acerca, pero estará brillante en el opuesto (fig. 5-5A); si el índice del grano es más bajo que el del aceite, ocurrirá lo contrario (figura 5-5B).

En algunos microscopios (y para diferentes posiciones de inserción del objeto opaco en el camino de la luz), «el sombreado hacia la sombra» (figu-

FIGURA 5-5

**Aspecto que presenta bajo iluminación oblicua (sombra de un objeto introducido por la parte izquierda del campo) un grano cuyo índice es mayor (A) o menor (B) que el del aceite que le rodea. Según los diferentes microscopios y las diferentes posiciones del objeto que produce la sombra puede invertirse el efecto.**




ra 5-5A) puede indicar que el índice del grano es menor que el del aceite en lugar de ser mayor. Para tales microscopios, «el sombreado que se retira de la sombra» (fig. 5-5B) indicará que el grano tiene mayor índice de refracción que el aceite. Por consiguiente, es necesario para cada microscopio comprobar el significado de «sombreado hacia la sombra» y de «sombreado que se retira de la sombra» con la ayuda de un grano de índice conocido, inmerso en un aceite de conocido índice de refracción o, más sencillo aún, por el test de la línea de Becke de un grano examinado con iluminación oblicua.

La iluminación oblicua puede producirse por nueve o más métodos, de entre los cuales, los más convenientes son: 1) inserción lenta por debajo del polarizador de una cartulina (o de un dedo) en el camino de la luz (fig. 5-6*a*); 2) inserción parcial de un accesorio en la hendidura de los accesorios hasta que su armadura de metal intercepte la luz (fig. 5-6*b*), o, 3) inserción parcial del analizador hasta que su armadura intercepte la luz (fig. 5-6*c*). Saylor (1935) sugiere que un objetivo de bajo aumento incrementa la sensibilidad del método. El estudiante avanzado puede usar el método de «doble diafragmado»

([2]) En ocasiones se denomina método de Schroeder van der Kolk.

de iluminación oblicua de Saylor, que aumenta considerablemente la precisión de la técnica.

**Comparación de los métodos.** De acuerdo con Saylor (1935, pág. 285) el método de la línea de Becke es más sensible que el de iluminación oblicua (pero menos que el propuesto por él, de «doble diafragmado» con iluminación oblicua). Los resultados de Saylor (tabla 5-1) indican que el objetivo de

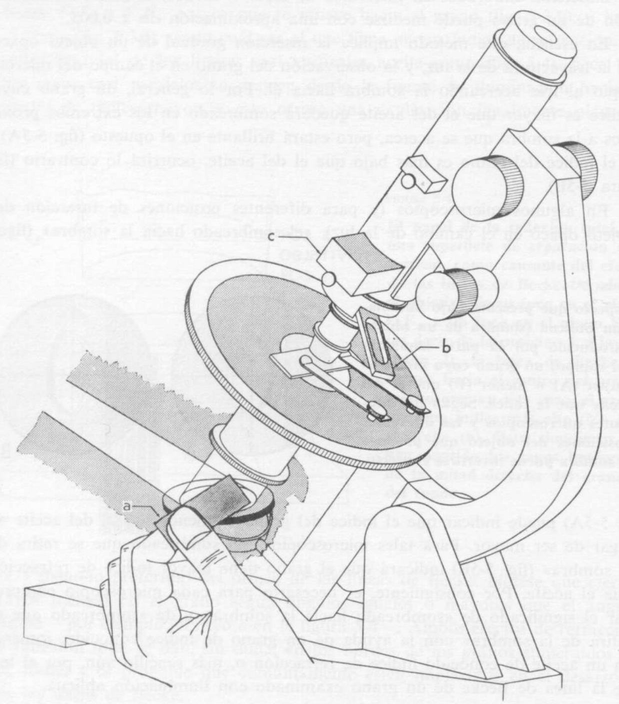



FIGURA 5-6

**Forma de producir de una manera conveniente la iluminación oblicua, interceptando aparte la luz con una cartulina colocada en a, con una armadura metálica de un compensador en b o con la armadura del (parcialmente insertado) analizador en c.**

aumento medio (10x, N.A. 0,25), que él denomina «objetivo de bajo poder», proporciona la máxima precisión para la determinación de índices de refracción, pues es el que mejor combina el aumento grande con una apertura baja.

Un procedimiento excelente para determinar el índice de refracción de

una substancia desconocida es usar la técnica de iluminación oblicua en los primeros montajes en aceite y el método de la línea de Becke para las determinaciones finales, cuando el grano y el aceite tienen próximo el índice. En este caso, las ventajas de la iluminación oblicua (rapidez y comprobación simultánea de todos los granos que entran en el campo del microscopio), se combinan con las de la línea de Becke (mayor precisión que la iluminación oblicua ordinaria).

TABLA 5-1
(Según Saylor, 1935, fig. 6)

| | Error en la medida del índice de refracción de la lámina de vidrio | | |
|---|---|---|---|
| | | *Por iluminación oblicua* | |
| *Objetivo* | *Por la línea de Becke* | *Ordinaria* | *Diafragmado doble* |
| 10x N.A. 0,25 | ±0,0005 | ±0,0005 | $<$ ±0,0005 |
| 20x N.A. 0,40 | ±0,0009 | ±0,0010 | ±0,0005 |
| 45x N.A. 0,85 | ±0,0012 | $>$ ±0,0020 | ±0,0006 |

**Colores de dispersión.** Si el $n_D$ del grano está cercano al $n_D$ del aceite que le rodea, se observará que las dos líneas de Becke (o bien las áreas sombreadas y brillantes producidas por la iluminación oblicua), poseen distintas coloraciones si la fuente de iluminación es de luz blanca. Evidentemente la luz blanca es dispersada en los límites del grano, en su espectro (como el prisma dispersa los rayos de sol; véase pág. 26). Una observación detallada de estos colores de dispersión ayuda a determinar si el $n_D$ del grano es mayor, igual o menor que el del aceite. Así, el $n_D$ del mineral puede estimarse en una aproximación mayor de ±0,002 (Emmons y Gates, 1948, pág. 612), aunque se emplee luz blanca en lugar de luz de sodio.

Como ya se discutió, el índice de refracción de un material isótropo es diferente según las distintas longitudes de onda de la luz. Las curvas de dispersión de la figura 5-7A lo ponen de manifiesto en un grano y aceites típicos. Tales curvas de dispersión cuando se proyectan en un papel de dispersión de Hartmann, como el de la figura 5-7A, son, por lo común, líneas rectas con inclinación hacia abajo para las luces de longitudes de onda mayor. Sin embargo, proyectadas en un papel gráfico en una escala linear ordinaria de longitudes de ondas, son curvas. Esto significa que la inclinación de estas líneas de dispersión es, por lo general, menos aguda para un cristal que para un aceite de igual índice de refracción. Por consiguiente, las líneas de dispersión que representen un aceite y un grano no podrán jamás coincidir; en el mejor de los casos se cortarán en un punto. Este punto señala $\lambda_m$, la longitud de onda de la luz para la cual ambos, mineral y aceite, tienen precisamente el mismo índice. En la figura 5-7A, por ejemplo, $\lambda_m$ equivale a 5500 Å y el índice de refracción del aceite y del cristal para la luz de esta longitud de onda es un poco mayor que 1,546.

Consideremos ahora granos de este mineral montados en este aceite. Si como es el caso común, el cristal se adelgaza en sus extremos, cualquier luz blanca incidente en ellos quedará dispersada en un espectro (fig. 5-7B). Para

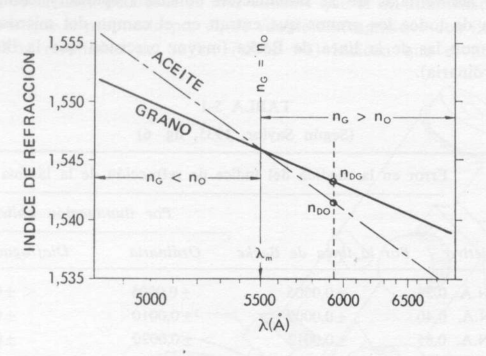



FIGURA 5-7 A

**Curvas de dispersión (en una publicación de Hartmann) de un aceite típico, y de un grano cuyos índices ($n_o$ y $n_g$ respectivamente) son iguales para una longitud de onda $\lambda_m$ (5500 Å). Nótese que, como es el caso más común, la pendiente de la curva del aceite es mayor que la del grano.**

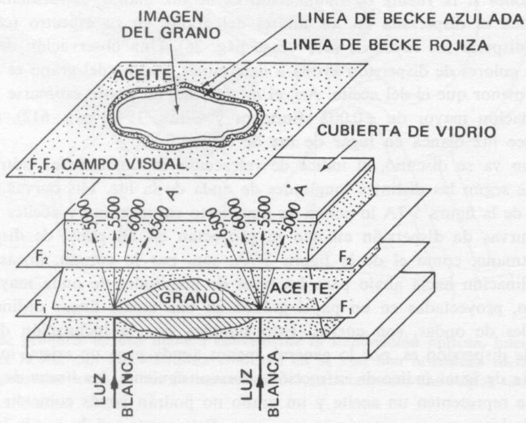



FIGURA 5-7 B

**Dispersión de la luz blanca en los bordes del grano, en el aceite de la figura 5-7 A. El campo visual $F_2F_2$ es el que se ve cuando se enfoca el microscopio en el plano $F_1F_1$, donde el grano no se ve con tanto detalle como en $F_2F_2$. Los ángulos entre los rayos luminosos, de diferente longitud de onda, se han exagerado.**

luz de longitud de onda superior a $\lambda_m$, el índice de refracción del grano es mayor que el del aceite, es como si el grano actuase como una pequeña lente condensadora que hace mayor estos rayos. Para luz de longitud de onda más corta que $\lambda_m$, el índice de refracción del grano es menor que el del aceite, así el grano actúa como una lente divergente para estas longitudes de onda más cortas. Por otro lado, la luz de $\lambda_m$ pasa a través del grano y del aceite sin sufrir dispersión. Como resultado de estos efectos de dispersión las líneas de Becke que rodean el grano están coloreadas con nitidez, aunque los no experimentados tengan en un principio dificultad para distinguir esos colores. Por tanto, si se observa el grano al ser levantado el tubo del microscopio, desde la posición $F_1$ (posición de enfoque perfecto) hasta la $F_2$ (fig. 5-7B), se aprecia una línea roja o rojo anaranjada que se desplaza hacia el centro del grano, mientras que una línea de Becke violeta o azul se mueve hacia fuera en el aceite. Como puede deducirse por la figura 5-7A, la línea de Becke rojiza se compone de longitudes de onda mayores de 5500 Å, y la línea azulada, de longitudes de onda menores de 5500 Å. Podemos entonces enunciar la siguiente regla: *Una línea coloreada de Becke,* observada al levantar el tubo del microscopio, *se desplaza hacia el medio que tiene el índice de refracción mayor para la luz de longitudes de onda que la componen.*

**Interpretación de las líneas de Becke.** En el proceso de la determinación de los índices de refracción por el método de inmersión, el grano puede colocarse en un aceite cuyo índice de refracción sea tan diferente del índice de refracción del grano que las líneas de dispersión no queden comprendidas en el intervalo visible (fig. 5-8A). Por consiguiente, ni con el aceite I, ni con el II, se observarán líneas de Becke coloreadas en los extremos del grano. Cuando está en el aceite I, una línea de Becke blanca muy intensa penetra en el aceite al levantar el tubo del microscopio. En el caso del grano que está sumergido en el aceite II, los resultados son inversos, pues la línea brillante de Becke se desplaza hacia el grano. La falta de color en la línea de Becke indica entonces que las curvas de dispersión del grano y del aceite no llegan a cortarse dentro del espectro visible.

Consideremos granos de este mineral respectivamente inmersos en dos aceites (III y IV en la figura 5-8B), cuyas líneas de dispersión intersectan con las del grano, aunque sólo en los extremos del espectro visible. Las líneas de Becke tenderán ahora a estar débilmente coloreadas, aunque la línea brillante de Becke aún será mucho más intensa que la oscura. En el caso del grano que está en el aceite III, una línea brillante de Becke blanco azulada se desplazará hacia el aceite al levantar el tubo del microscopio; al mismo tiempo, una línea de Becke rojizo oscura entrará en el grano. Por otra parte, en el aceite IV entrará en el grano una línea brillante blanco amarillenta, mientras que otra menos intensa, violeta oscura, se desplazará hacia el aceite. En cualquier caso, la línea brillante de Becke penetra en el medio de mayor índice de refracción para la mayoría de las longitudes de onda luminosas. Las líneas particulares de Becke indican por sus intensidades desiguales, que las líneas de dispersión del grano y del aceite se cortan exclusivamente fuera de la franja del espectro visible.

La última meta del método de inmersión es sumergir el grano en un aceite cuyo índice de refracción (para la luz de sodio) iguale precisamente al del grano (fig. 5-8C); *si se ilumina con luz de sodio,* el criterio para un resultado exacto es la desaparición total de la línea de Becke; el grano (si es incoloro y transparente) se vuelve completamente invisible en el aceite. *Si se ilumina*

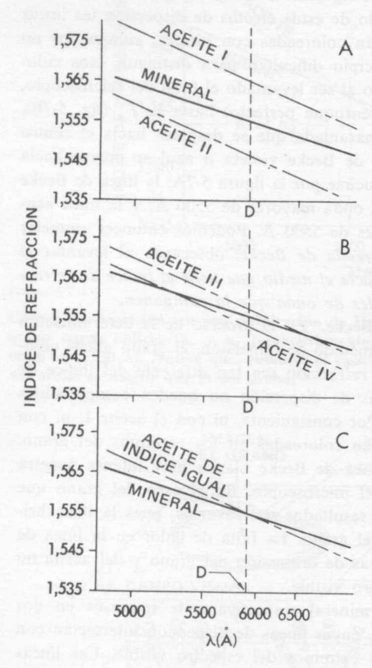



FIGURA 5-8

**Explicación de los movimientos y colores de la línea de Becke de acuerdo si (y donde) se cortan las curvas de dispersión del grano y del aceite dentro del espectro visible.**

*con luz blanca,* el criterio para un resultado exacto es: 1) la aproximada igualdad en intensidad de las dos líneas de Becke, y 2) el color de estas líneas de Becke.

De acuerdo con Wright (1913, págs. 75-76), la igualdad en intensidad de las dos líneas de Becke significa que «el índice de refracción del líquido y del mineral son iguales para una longitud de onda igual o aproximada de 5500 Å y el error de la determinación de $n_D$ por este método no está por encima de ±0,002...». Wright añade, sin embargo, que es probable que este error sea bastante más elevado si se usan líquidos muy dispersantes tales como el iodido de metileno (que se denomina comúnmente diyodometano). En realidad, por tanto, los índices de refracción del aceite y del mineral son

iguales para la longitud de onda de 5893 Å; la línea de Becke que penetra en el aceite debe ser ligeramente más intensa que la que entra en el grano. Para llegar a tal igualdad, la línea de Becke que penetra en el grano debe ser amarilla, ligeramente anaranjada, mientras que la que entra en el aceite debe ser azul verdosa.

Si la serie de líquidos de inmersión que se usa está compuesta por mezclas binarias entre el aceite mineral (1,470), $\alpha$-monocloronaftaleno (1,633), y diyodometano (1,739) —o por aceites de dispersión similar—, los colores que se observarán en las líneas de Becke (o en las sombras de iluminación oblicua) son una clave importante para diferenciar el índice, con luz de sodio, entre el grano y el aceite de inmersión (fig. 5-9). Estas interpretaciones del color se supone que se hacen con una fuente de iluminación que sea de una lámpara blanca de tungsteno equipada con un filtro de «luz de día». El uso práctico de la figura 5-9 es evidente. Por ejemplo, se observa que una línea de Becke blanca penetra en un grano de un mineral desconocido, que está sumergido en un aceite de índice 1,700. La figura 5-9 indica que el índice del grano excede probablemente al del aceite en 0,033 ó más. El aceite para la nueva montura deberá ser entonces de 1,733 como mínimo. Los límites entre los colores de la línea de Becke dibujados en la figura 5-9 son, como es natural, sólo aproximados. La figura 5-9 comprende sólo el intervalo en el cual la dispersión, $n_F - n_C$, del mineral que se está examinando se aproxima en un valor de 0,015 a la media supuesta que ha servido de base para la figura.

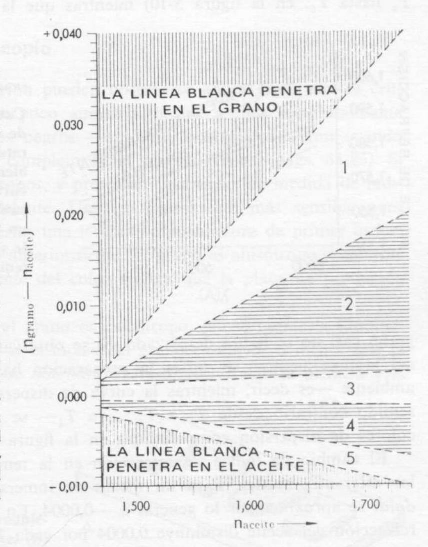



FIGURA 5-9

**Relación aproximada de los colores de la línea de Becke y de los movimientos con respecto a la diferencia del índice de refracción (para luz de sodio) entre el grano y el aceite de inmersión (al subir el tubo del microscopio). Área 1.ª: línea blanco-amarillenta que penetra en el grano; la azulvioleta oscura penetra en el aceite. Área 2.ª: la amarillo limón penetra en el grano; la azul violeta, penetra en el aceite. Área 3.ª: la anaranjada-amarillenta se desplaza hacia el grano; la azul cielo penetra en el aceite. Área 4.ª: la naranja-rojiza entra en el grano y la azul-blanquecina penetra en el aceite. Área 5.ª: la pardo rojiza oscura se mueve hacia el grano; la blanco-azul hacia el aceite.**

**Efecto de temperatura.** Los índices de refracción de los aceites de inmersión decrecen apreciablemente al elevarse la temperatura, mientras que los de los sólidos quedan poco afectados. Como experimento instructivo, coloquemos un grano en un aceite cuyo índice sea lo suficientemente alto para que su curva de dispersión no llegue a cortar a la curva de dispersión del grano, a la temperatura ambiente (fig. 5-10). Luego, calentar suavemente la montura en una placa caliente (sin llegar a hervir) hasta alcanzar una temperatura $T_5$; la curva de dispersión del aceite se habrá ido trasladando (desde $T_1$ hasta $T_5$, en la figura 5-10) mientras que la curva de la dispersión del

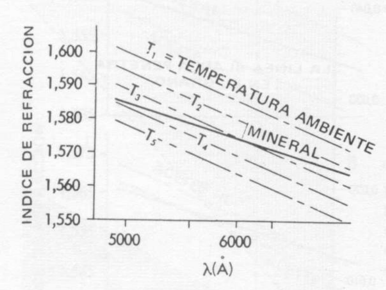



FIGURA 5-10

**Cambio en la curva de dispersión de un aceite al elevarse su temperatura desde la temperatura ambiente hasta $T_5$. En contraste, la curva de dispersión del mineral sumergido en el aceite, no sufre un cambio significativo cuando se le somete al mismo incremento de temperatura.**

grano casi no se habrá desplazado. Si se observan al microscopio los bordes del grano, mientras se enfría la preparación hasta llegar a la temperatura ambiente —es decir, mientras la curva de dispersión del aceite se mueve en sentido contrario desde $T_5$ a $T_4$ ... a $T_1$— se podrá apreciar la gama de colores de dispersión comprendidos en la figura 5-9.

El cambio de índice de refracción en la temperatura, $dn/dt$, varía para los diferentes aceites. Para un medio de inmersión de alrededor de 1,633, $dn/dt$ se aproxima por lo general a —0,0004. En otras palabras, el índice de refracción del aceite disminuye 0,0004 por cada 1 °C que aumenta la temperatura del aceite. Para aceites del orden de 1,739, $dn/dt$ está por lo general alrededor de 0,0007. El valor $dn/dt$ viene generalmente señalado en la etiqueta de cada aceite de las series que pueden adquirirse en el mercado.

## PROCEDIMIENTOS PRÁCTICOS

### Montaje de una preparación

Primero se pulveriza el cristal desconocido y se separan por tamizado los granos de tamaño comprendido entre 100 y 200 mallas. (En el caso de materiales en polvo desconocidos, también se ha seguido el mismo proceso.) El aceite de inmersión que se elige debe tener un índice de refracción igual al del material del que se sospecha que es el cristal; si no hay una clave

para identificarlo, deberá usarse un aceite de 1,53. Colóquese una gota de aceite en el portaobjetos sacudiendo el cuentagotas sobre él; el cuentagotas no debe tocar nunca el portaobjetos porque pudiera ser que el medio de inmersión se contaminara de granos minerales que se adhirieran, por contacto, al cuentagotas. Vuélvase a colocar inmediatamente en su sitio el aceite de inmersión, *con su tapa bien ajustada.* Espolvoréense unas cuantas docenas de granos del cristal desconocido en la gota de aceite, y cúbrase esto con un cubreobjetos de vidrio de 1 cm² de tamaño, aproximadamente.

## Observaciones al microscopio

Los granos de la preparación pueden observarse ahora entre nicoles cruzados, usando el objetivo de poco aumento. Si los granos son totalmente isótropos, permanecerán todos negros —es decir, extinguidos— aun cuando se observen durante un giro completo de la platina (véanse págs. 83-85). Si los granos brillan, son anisótropos, y presentan problemas de medida de índices que se tratarán más adelante. Un test ligeramente más sensible para conocer la anisotropía es insertar una lámina compensadora de primer orden, a la vez que se procede como anteriormente. El grano es anisótropo si durante la relación su color es diferente del color violeta que la placa ha producido en el aceite que la rodea.

Después de verificar que el grano es anisótropo, puede usarse la iluminación oblicua para determinar si el índice del grano es mayor o menor que el del aceite. Probablemente no se obtendrá un resultado exacto la primera vez,

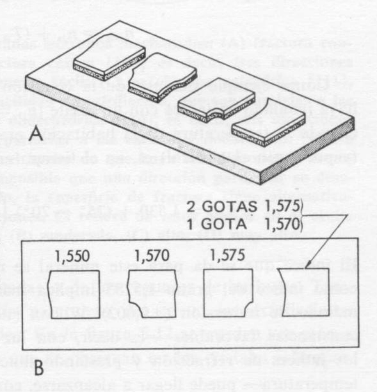



FIGURA 5-11

**(A) Lámina de vidrio con cubreobjetos sobre las monturas de aceite. (B) Visión plana de la lámina tal como se esquematizó en el cuaderno. Para cada montura, se ha anotado el índice de refracción usado (el que viene señalado en la etiqueta). Nótese que el aceite de igual índice que el grano es una mezcla de dos aceites de la serie.**

haciéndose necesario seleccionar un segundo aceite de inmersión, y preparar una segunda montura (en la misma lámina de vidrio). Es aconsejable hacer en un cuaderno el esquema de la lámina (fig. 5-11) y etiquetar cada montura con los índices del aceite empleado. Las observaciones deben comprobarse

para ver si a la temperatura ambiente los índices de refracción de los aceites de las monturas (*bajo el cubreobjetos de vidrio*) no cambian de manera significativa, aun después de un lapso de tiempo de varias horas.

Después de haber montado los granos en el aceite de índice muy semejante, las intensidades relativas y los colores de dispersión de la línea de Becke pueden utilizarse para determinar el índice de refracción del grano para luz de sodio, con una aproximación de ±0,002, siempre que el índice de dicho aceite esté corregido de acuerdo con la temperatura, como se describe en el siguiente apartado.

## Corrección del índice con la temperatura

La etiqueta de un frasco de un aceite de inmersión suele generalmente traer consignadas las siguientes características: $n_D$, su índice de refracción para la luz de sodio; $T$, la temperatura a la cual el aceite posee ese índice; y $dn/dt$, el valor del cambio del índice por cada grado de cambio de temperatura (véanse págs. 74-75). Cuando se mide el índice, la data es, aunque no se compruebe a menudo, una más que añadir a las que vienen indicadas en la etiqueta. Normalmente, aunque la fuente de luz puede calentar después de un largo período de tiempo la montura, la temperatura del aceite en la montura es semejante a la temperatura de la habitación, $T_R$. Si $T_R$ es semejante a $T$, el índice del aceite en la montura de polvo será el mismo ($n_D$) que el que viene consignado en la etiqueta. Si ambas no son iguales, entonces debe calcularse el índice del aceite de la montura, $n_{DM}$:

$$n_{DM} = n_D + (T_R - T)\frac{dn}{dt} \qquad \text{(Ec. 5-2)}$$

Como ejemplo del uso de la ecuación 5-2, imagínese que el mineral se haya igualado en índice con un aceite ($n_D = 1{,}530$, $T = 20°C$, $dn/dt = 0{,}0003$), cuando la temperatura de la habitación era de 25°C. El índice real del aceite (y por tanto el mineral) es, en el tiempo en que se ha alcanzado la igualdad,

$$n_{DM} = 1{,}530 + (25° - 20°)\left(\frac{-0{,}0003}{1°}\right) = 1{,}5285$$

El índice que se da para este mineral se redondea hasta 1,528 ó 1,529; dar como índice del grano 1,5285 implica más exactitud que la que permite el método de inmersión (±0,002). Wilcox (1959, pág. 1286) cree que bajo circunstancias favorables —es decir, con luz de sodio, pequeños intervalos en los índices de refracción y prestando mucha atención a las correcciones de temperatura— puede llegar a alcanzarse, con los métodos de la línea de Becke, una precisión de ±0,001. Las técnicas avanzadas, tales como el método de doble variación de Emmons (1943), permiten una exactitud de ±0,0002.

Además de medir el índice de refracción pueden hacerse a la vez otras observaciones. Puede anotarse el color transmitido por los granos. Las inclu-

siones que hay dentro de los granos —tales como burbujas vacías, burbujas rellenas de líquido, cristales minúsculos, cavidades en las que hubo pequeños cristales (lo que se llama cristales negativos) o cristalitos— pueden encontrarse con un objetivo de gran aumento. También puede apreciarse el paralelismo linear de las inclusiones alargadas o de los regueros de burbujas. También pueden servir para conocer la naturaleza del cristal las exfoliaciones o fracturas de los granos machacados. En la figura 5-12 se pueden ver granos con los diferentes tipos de fractura que se observan en los cristales isótropos.

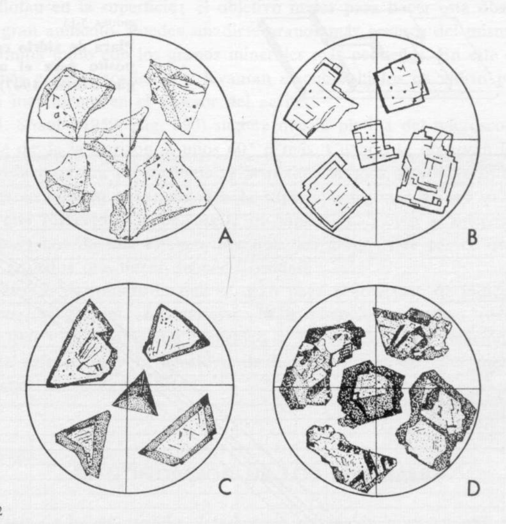



FIGURA 5-12

**Tipos de fractura muy comunes en granos isótropos machacados: (A) fractura concoidea pero sin exfoliación; (B) fractura cúbica {100} es decir, tres direcciones perpendiculares de exfoliación exactamente fácil; (C) exfoliación octaédrica {111}, es decir, cuatro direcciones de igual facilidad de exfoliación, que son paralelas a las caras de un octaedro; (D) exfoliación dodecaédrica {110}, es decir, seis direcciones de igual probabilidad de exfoliación paralelas a las caras del dodecaedro. Nótese que para la exfoliación dodecaédrica, el hecho de que haya seis direcciones «competidoras» para la exfoliación hace imposible que una dirección particular se desarrolle más que otras; por el contrario, la superficie de fractura sigue alternativamente una u otra de estas seis direcciones. El relieve de estos granos en el aceite varía de la forma siguiente: (A) bajo, (B) moderado, (C) alto, (D) muy alto.**

## Medida del peso específico

El peso específico de los minerales puede, en algunas ocasiones, determinarse dentro de límites muy estrechos, observando cómo éstos flotan o se

hunden en el aceite de inmersión de la montura. Para hacer más fácil esta observación, Foster (1947, pág. 463) sugiere el uso de una lámina de vidrio sobre la que se han colocado dos tiras de una segunda lámina de vidrio pe-

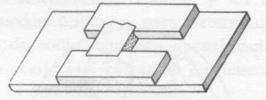


FIGURA 5-13

**Placa de vidrio con un depósito para el aceite (según Foster, 1947).**



FIGURA 5-14

**Relación entre el índice de refracción y la densidad de mezclas de diyodometano y $\alpha$-monocloronaftaleno.**

gadas con cola (fig. 5-13). Unas pocas gotas de líquido en el hueco que se forma así, una punta de espátula de minerales y la colocación de un cubreobjetos, producen una preparación con una profundidad de aceite suficiente para permitir distinguir con facilidad los granos que quedan en el fondo y los que flotan en la superficie; el objetivo mejor para hacer esta observación es el de gran aumento. Pueden añadirse granos más gruesos del mismo vidrio que la lámina junto con los granos minerales más pequeños. En este caso, los granos más gruesos sostienen y levantan el cubreobjetos de vidrio para producir un incremento en el espesor del aceite.

B. M. Shaub (1959, pág. 890) sugiere que la platina del microscopio debe inclinarse desde la horizontal unos 60° o más. Cuando se observan los minerales con la montura así inclinada y la platina se gira, puede verse cómo las partículas se hunden o ascienden a la superficie según cual sea su densidad relativa con respecto a la del aceite de inmersión. Como el microscopio de polarización nos da una imagen invertida, los granos que parece que se elevan son aquellos que tienen mayor densidad.

Los aceites de inmersión que se usan para el intervalo de índice 1,633 a 1,739, por lo general son mezclas de $\alpha$-monocloronaftaleno (densidad a 20° = 1,194) y diyodometano (densidad a 20° = 3,325). La relación entre el índice de refracción y la densidad de una serie tipo de tales mezclas está representada en la figura 5-14.

## IDENTIFICACIÓN DE LOS MINERALES

Después de haber medido el índice de refracción *n* de un mineral desconocido, consúltese la tabla II-1 (apéndice II, pág. 264) para determinar, si es posible, la identidad del mineral.

# 6

# Indicatrices y elipsoides ópticos

## REVISIÓN DE LA TERMINOLOGÍA

Un rayo de luz representa el camino por el cual se propaga, en línea recta un flujo de energía infinitamente fino que procede de una fuente luminosa La energía se propaga a lo largo de este rayo como una serie de vibracione que en un medio isótropo son perpendiculares a la trayectoria del rayo (figura 6-1A), pero en uno anisótropo por lo general no lo son (fig. 6-1B). Una dirección normal de onda puede definirse como aquella que: 1) yace en e mismo plano que la trayectoria del rayo y la dirección de vibración, y 2) e perpendicular a la dirección de vibración. Sólo la luz que se transmite en medios isótropos tiene la normal de onda y la dirección del rayo coincidentes; en medios anisótropos por lo general no ocurre esto.

RAYO (=W. N.)

A

W.N.

RAYO

B

FIGURA 6-1

**Relaciones geométricas entre la trayectoria del rayo (flecha más oscura), normal de onda (línea de trazos) y direcciones de vibración (flechas pequeñas). (A) Para luz en medios isótropos; (B) para luz en medios anisótropos. Todas las líneas están en el plano del papel. La normal de onda (W. N.) es perpendicular a las direcciones de vibración.**

Hablar de un rayo, con palabras, es desde luego irreal. El haz de luz más fino que pudiera aislarse no sería infinitamente fino, estaría formado por numerosos rayos. Los puntos de estos rayos, que en un momento dado estuvieran en el mismo estado de vibración (por ejemplo, los puntos *a, b, c, d* y *e* de la figura 6-2A), se dice que están en fase uno con respecto a otro. Una superficie formada por la integración de todos estos puntos constituye una superficie o frente de onda. Las direcciones de vibración de estos rayos son

siempre paralelas (o tangentes) a este frente de onda. La normal de onda es perpendicular a él. Las trayectorias de los rayos no son en general perpendiculares a los frentes de onda excepto en los medios isótropos, y en casos especiales, en medios anisótropos cuando coinciden con la normal de la onda.

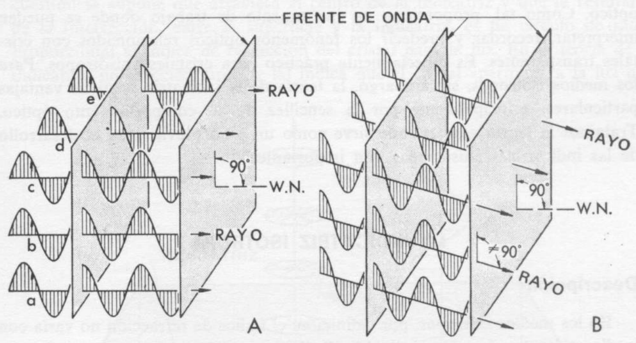



FIGURA 6-2

**Relaciones geométricas entre los frentes de onda, normales de onda y trayectorias de los rayos en (A) medio isótropo y (B) medio anisótropo. Para simplificar, sólo se ha considerado luz polarizada. En (B) las trayectorias de los rayos no son perpendiculares a los frentes de onda.**

## CONCEPTO GENERAL DE LA INDICATRIZ

La indicatriz óptica sirve para explicar cómo varía el índice de refracción de un material transparente de acuerdo con la dirección de vibración de la onda luminosa en el material (se supone que es luz monocromática). Consi-

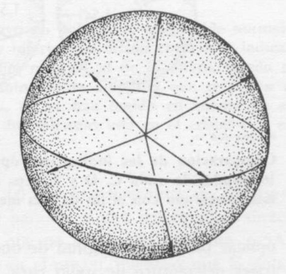


FIGURA 6-3

**Indicatriz isótropa de un cristal para luz de sodio. El índice de refracción del cristal para la luz de sodio ($n_D$), permanece constante sin depender de la dirección en la cual vibre la luz; la indicatriz es por tanto una esfera.**

dérese un número infinito de vectores irradiando en todas las direcciones a partir de un punto interior del cristal. Cada vector se dibuja proporcional, en

longitud, al índice de refracción del cristal, para luz que vibre paralela a la dirección de este vector. La indicatriz es la superficie que forman todos los extremos de esos vectores. Los vectores se omiten cuando se dibuja esa superficie que forman, pero en la figura 6-3 se han colocado algunos como ejemplo. La indicatriz es un mero método para hacer razonable un fenómeno óptico. Como tal, proporciona un instrumento de trabajo donde se pueden interpretar, recordar y predecir los fenómenos ópticos relacionados con cristales transparentes. Es especialmente práctico para cristales anisótropos. Para los medios isótropos, sin embargo, la teoría de la indicatriz no tiene ventajas particulares, principalmente por la sencillez de su comportamiento óptico. Tratamos la teoría aquí porque sirve como un paso previo para el desarrollo de las indicatrices anisótropas, tan importantes.

## LA INDICATRIZ ISÓTROPA

### Descripción

En los medios isótropos, por definición, el índice de refracción no varía con la dirección de vibración de la luz. En consecuencia, todos los vectores que relacionan el índice de refracción con la dirección de vibración son de igual longitud, y por tanto, todas las indicatrices isótropas son esferas perfectas (figura 6-3). Los vidrios transparentes, los líquidos y los cristales cúbicos —no sometidos a tensión— se caracterizan por tales indicatrices.

Como ya se dijo al hablar de la dispersión, el índice de una substancia isótropa varía de acuerdo con la longitud de onda usada. Por ejemplo, el cloruro de sodio tiene los índices $n_C = 1{,}541$, $n_D = 1{,}544$ y $n_F = 1{,}553$. Técnicamente, por tanto, existen ligeras diferencias de tamaño en las indicatrices

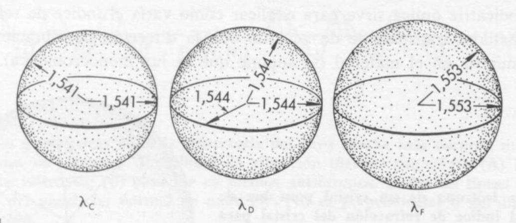



FIGURA 6-4

**Comparación de las indicatrices ópticas de cloruro de sodio cristalizado para las longitudes de onda C, D y F. Los cambios dimensionales entre las tres esferas, se han exagerado con el fin de una mejor ilustración.**

ópticas para cada longitud de onda de luz. La figura 4-6 muestra las indicatrices del cloruro de sodio para las luces C-, D- y F- respectivamente. Para longitudes de onda intermedias, las indicatrices serán también intermedias entre las que se muestran.

## Aplicación

La incidencia de la luz sobre la superficie de un material isótropo exige poca complicación en la teoría de la indicatriz. La superficie del cristal en cuestión se supone que atraviesa el centro de la indicatriz y que la resultante de la intersección, entre la superficie y la indicatriz, es un círculo de radio proporcional al índice de refracción del cristal para la luz. En la teoría de la indicatriz, una sección circular tal indica que el cristal «permite» a la luz que

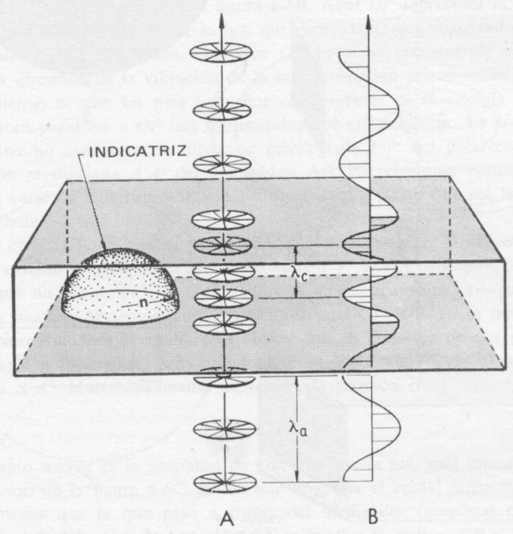



FIGURA 6-5

**Efecto de una placa isótropa sobre (A) un rayo no polarizado que incide normalmente y (B) un rayo polarizado. La superficie inferior del cristal corta a la indicatriz isótropa esférica según un círculo de radio, n, igual al de la esfera, siendo n el índice de refracción de la placa. Los cambios de la amplitud que se deben a pérdidas por reflexión en las interfases, etc..., no se han tenido en cuenta en el dibujo. Nótese que la longitud de onda de la luz mientras está en el cristal ($\lambda\alpha$) es más pequeña que en el aire ($\lambda\alpha$).**

entra, vibrar en él, en la misma dirección (*s*) que lo hacía antes de penetrar, es decir: no es necesario que la luz vibre paralela a una determinada dirección para atravesar el cristal. Así, la luz que no está polarizada (fig. 6-5A) permanece sin polarizar después de entrar en el cristal, mientras que la polarizada (fig. 6-5B) conserva el mismo plano de polarización que tenía antes de entrar.

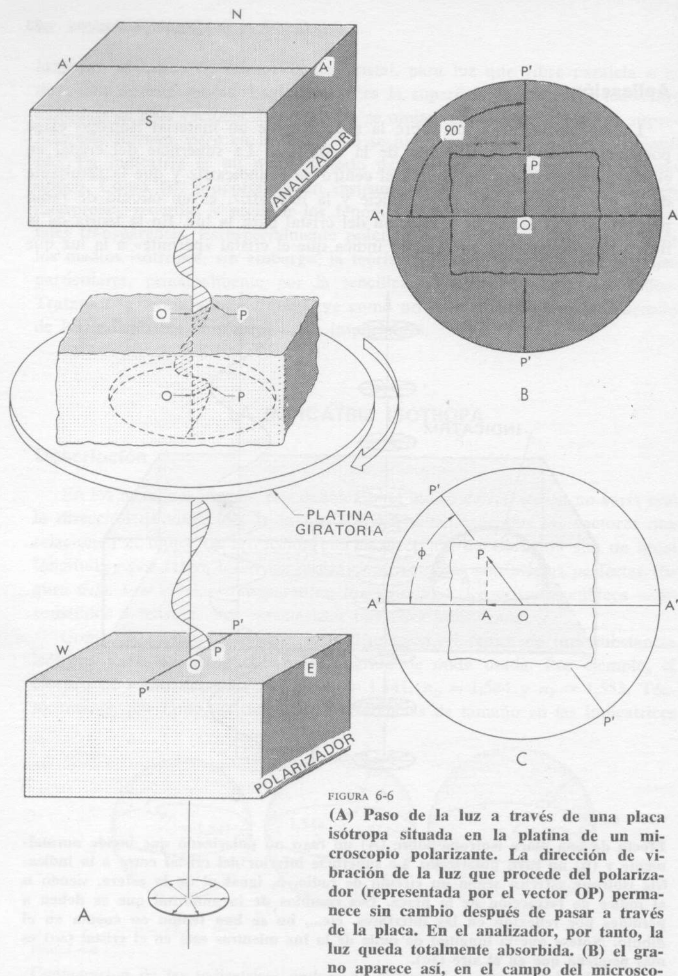



FIGURA 6-6

**(A) Paso de la luz a través de una placa isótropa situada en la platina de un microscopio polarizante. La dirección de vibración de la luz que procede del polarizador (representada por el vector OP) permanece sin cambio después de pasar a través de la placa. En el analizador, por tanto, la luz queda totalmente absorbida. (B) el grano aparece así, en el campo del microscopio, negro (extinguido), cuando se observa con nicoles cruzados. OP representa vectorialmente la amplitud y la dirección de vibración de la luz que procede del polarizador, antes y después de su paso a través del cristal. OP no tiene componente paralelo a A′A′, la dirección privilegiada del analizador, si los nicoles están cruzados. Por tanto no se transmite luz a través del analizador. (C) Si el analizador o el polarizador se giran en una armadura de manera que formen un ángulo $\phi$, entre sus direcciones privilegiadas, diferentes de 90°, entonces hay un componente de OP (es decir, OA) que es paralelo a A′A′, la dirección privilegiada del analizador. Por consiguiente, el analizador transmite un componente de la luz, y el grano no aparece ya extinguido.**

Puesto que los materiales isótropos no pueden alterar la dirección de polarización de la luz que entra un grano isótropo, visto entre nicoles cruzados, aparece siempre extinguido (esto es, no transmite luz) aun durante un giro de 360° de la platina [1]. Esta propiedad sirve como comprobación del carácter isótropo de una substancia. La siguiente explicación lo aclarará. La luz procedente del polarizador atraviesa el cristal con una dirección de vibración N-S que no varía (fig. 6-6A). Al llegar al analizador, que por lo general transmite sólo luz que vibra E-O, toda la luz es absorbida y el analizador actúa como una pantalla opaca para esta luz. La situación se considera desde el punto de vista vectorial en la figura 6-6B. Aquí *OP* representa la amplitud y dirección de la vibración de la luz, que, procedente del polarizador, pasa a través del cristal. Por tanto, el vector *OP* no tiene componente paralelo a *A'A'*, la dirección de la vibración de la luz transmitida por el analizador. Por consiguiente, ni aun los más pequeños componentes de la energía luminosa que vibran paralelos a *OP* son transmitidos por el analizador. La rotación de la platina no cambia ni la dirección privilegiada *P'P'* del polarizador ni la dirección privilegiada *A'A'* del analizador. Así, las relaciones vectoriales que pueden verse en la figura 6-6B son las mismas, cualquiera que sea la posición de la platina.

Por otra parte, si bien el polarizador o el analizador es girado de manera que se cambie $\phi$ (phi), o sea el ángulo entre *P'P'* y *A'A'* (fig. 6-6C), hasta un valor que no sea de 90°, el grano isótropo ya no aparecerá extinguido entre los dos nicoles. Ahora un componente vectorial *OP* (*OA* en la figura 6-6C) será transmitido por el analizador. Nótese que la amplitud de *OA* puede determinarse gráficamente, proyectando una perpendicular desde el punto *P* a la línea *A'A'*. Matemáticamente expresada, la relación es:

$$OA = \cos \phi \cdot OP \qquad \text{(Ec. 6-1)}$$

Cuanto mayor es la amplitud de vibración de la luz, más intensa es ésta. En el caso de la figura 6-6C, la luz que atraviesa el cristal (amplitud *OP*) es más intensa que la que pasa a través del analizador (amplitud *OA*). Sólo cuando el ángulo $\phi$ de la ecuación 6-1 es igual a 0 grados, *OP* y *OA* serán iguales y por tanto representarán igual luminosidad.

## LA INDICATRIZ UNIÁXICA

### Origen histórico

La descripción y discusión de todos los pasos que precedieron a la concepción de la teoría de la indicatriz por Fletcher (1891), no pueden ser incluidos aquí. Sin embargo, en los capítulos siguientes presentaremos algunos de los descubrimientos más importantes que indicaron la existencia de otros ma-

(1) La posibilidad de actividad óptica queda aquí descartada.

teriales además de los isótropos (y, por consiguiente, la necesidad de otras leyes además de la de Snell para explicar su comportamiento óptico).

**Descubrimiento de los rayos O y E.** Erasmus Bartholinus, en 1669, dio a conocer que un punto en un papel (o un rayo luminoso), dan lugar, cuando se ven a través de un rombo de calcita, a dos imágenes. Así, un rayo que incide normalmente (por ejemplo, *PO* en la figura 6-7) produce no sólo un rayo $OP_O$ sino también otro $OP_E$; ambos rayos siguen diferentes caminos

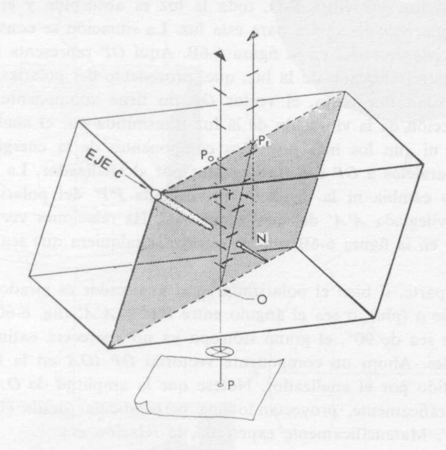



FIGURA 6-7

**Refracción doble de un rayo no polarizado, PO, producido por un romboedro de espato de Islandia (calcita transparente) para formar dos rayos, $OP_O$ y $OP_E$. Si el romboedro se ve desde encima, se observan dos imágenes del punto P, una procedente de los rayos que emergen en $P_O$ y la segunda de los rayos que emergen en $P_E$. Se ha exagerado el ángulo entre los rayos $OP_O$ y $OP_E$ para mayor claridad. La línea $NP_E$ es perpendicular a la cara del romboedro.**

dentro del cristal. El rayo $OP_O$ se denomina *rayo ordinario* o *rayo O* (puesto que el camino que sigue se puede conocer por la ley de Snell), mientras que el rayo $OP_E$ fue denominado *rayo extraordinario* o rayo *E* (su camino era una contradicción a la ley de Snell). Esta naturaleza contradictoria del camino seguido por $OP_E$ era obvia puesto que $\angle r$ no era igual a 0 grados como requiere la ley de Snell.

Fresnel y Arago (1811) demostraron que los rayos *O* y *E*, en la calcita, estaban polarizados a 90° el uno del otro. Siempre que se observaba la luz que componía el rayo *O* vibraba formando ángulo recto con el plano que contenía la trayectoria de *O* y el eje *c* (es decir, vibraba perpendicular al plano sombreado de la figura 6-7). Por otra parte, se observó que la luz que componía el rayo *E* vibraba siempre dentro del plano. Además, siempre que un rayo incide normalmente en la superficie de un cristal anisótropo, las

vibraciones de los rayos refractados dentro del cristal son siempre paralelos a esta superficie. Así, en la figura 6-7, las vibraciones *E* y *O* son ambas paralelas a la cara inferior del romboedro.

**Limitaciones de la ley de Snell.** Aunque la ley de Snell no puede predecir correctamente la trayectoria del rayo *E*, puede determinar la dirección de su normal de onda asociada. La figura 6-8 es una sección transversal de un rayo *OP* no polarizado que pasa de un medio isótropo (índice de refracción: $n_i$) a un medio anisótropo, de manera que produce dos rayos refractados, el rayo

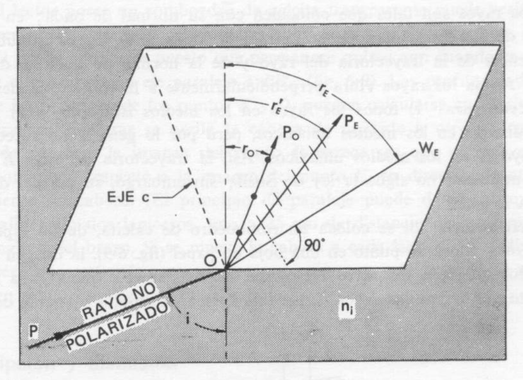



FIGURA 6-8

**Vista transversal del paso de un rayo de luz no polarizada, PO, desde un medio isótropo (sombreado) a un cristal uniáxico para formar un rayo ordinario $OP_O$, y un rayo extraordinario $OP_E$. La normal de onda de E, $OW_E$, es una dirección perpendicular a las direcciones de vibración, dibujadas a lo largo de $OP_E$; para subrayar esto, una de estas vibraciones se ha prolongado con línea discontinua.**

ordinario $OP_O$ y un rayo extraordinario $OP_E$. Las direcciones de vibración de la luz para ambos rayos, están indicadas como sigue: las asociadas con $OP_E$ como líneas cortas, y las de $OP_O$ como puntos (puesto que las últimas vibraciones son precisamente perpendiculares al plano transversal de la sección). Como luego se tratará con más amplitud, el cristal presenta diferentes índices de refracción para estas dos direcciones de vibración diferentes: un índice $\omega$ para las vibraciones del rayo *O* y otro $\epsilon'$ para las vibraciones del rayo *E*. La ley de Snell se aplica al rayo ordinario de esta forma:

$$n_i \text{ sen } i = \omega \text{ sen } r_O$$

Pero no al rayo extraordinario, puesto que

$$n_i \text{ sen } i \neq \epsilon' \text{ sen } r'_E$$

sin embargo, si el ángulo de refracción se determina como $r_E$ —es decir, con respecto a la dirección $OW_E$ en la figura 6-8, en lugar de referirlo a la trayectoria del rayo *E*— la ley de Snell se aplica así:

$$n_i \text{ sen } i = \epsilon' \text{ sen } r_E \qquad \text{(Ec. 6-2)}$$

$OW_E$ es, por tanto, la dirección perpendicular a las direcciones de vibración que quedan marcadas a lo largo de $OP_E$, esto es, la normal de onda *E*.

Las limitaciones de la aplicación de la ley de Snell pueden ahora resumirse. La ley de Snell predice correctamente la trayectoria de los rayos, sólo si dichos rayos son tales que coinciden con su normal de onda; en la predicción de las direcciones de la normal de onda, esta ley es infalible. Tal coincidencia de la trayectoria del rayo y de la normal de onda se da, si la luz que forma los rayos vibra perpendicularmente a la trayectoria del rayo; esto sucede para: 1) todos los rayos en los medios isótropos, y 2) para el rayo ordinario en los medios uniáxicos, pero por lo general no sucede para 3) el rayo *E* en los medios uniáxicos. Así, la trayectoria del rayo *E* en los medios uniáxicos no sigue la ley de Snell; sin embargo, su normal de onda asociada lo hace.

**Birrefringencia.** Si se coloca un romboedro de calcita, de un espesor de 3 cm o más, sobre un punto en una hoja de papel (fig. 6-9), la imagen $P'_O$ del punto, formada por los rayos *O*, parece ser más oscura que $P'_E$, la imagen del punto que forma los rayos *E*. De esta forma, el espesor aparente del rom-

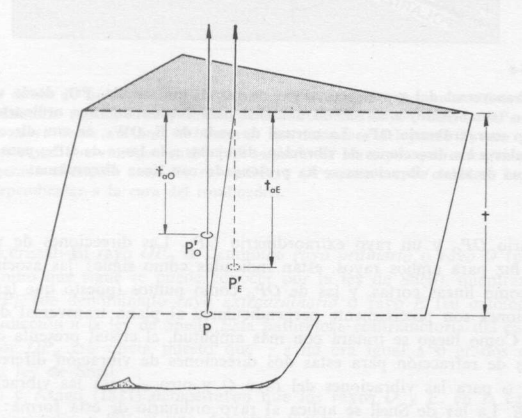



FIGURA 6-9

**La mitad frontal del romboedro de la figura 6-7 se ha eliminado para hacer visible el plano antes sombreado. $P'_O$ y $P'_E$ representan las posiciones aparentes de las imágenes de los rayos O y E del punto P tal como se ve al mirar a través del romboedro. Los espesores aparentes del romboedro para las imágenes de P según los rayos O y E (que es, $t_{aO}$; y $t_{aE}$ respectivamente) se comparan con el espesor real del romboedro, t.**

boedro para el rayo *O* (es decir, $t_{aO}$) es menor que para el rayo *E* ($t_{aE}$). Denominando al índice de refracción del cristal, para el rayo *O*, como $\omega$, y el del rayo *E* como $\epsilon'$, se hace aparente a partir de la ecuación del Duque de Chaulnes (ec. 5-1) que $\omega = t/t_{aO}$ y $\epsilon' = t/t_{aE}$, donde *t* significa el espesor real. Por consiguiente, el romboedro de calcita tiene dos índices de refracción, el mayor asociado al rayo *O*. La posesión de más de un índice de refracción se conoce con el nombre de birrefringencia; sólo las placas de cristal birrefringentes son capaces de producir la doble refracción, es decir, el desdoblamiento de las imágenes.

Si el lector posee un romboedro de calcita transparente puede verificar las anteriores observaciones y conclusiones como ejercicio. Como primer caso, el punto *O* puede conocerse puesto que permanece quieto aun cuando se observe al girar el cristal en un eje paralelo a $PP'_O$ (fig. 6-9). Las profundidades relativas de las imágenes de los puntos *E* y *O*, pueden calcularse cualitativamente al observarlas mientras se oscila la cabeza de un lado a otro. A causa del efecto de paralaje, la imagen del punto *O* parece ser que se mueve de un lado a otro, con respecto a la imagen del punto *E*, en dirección contraria al movimiento de cabeza. (El principio de paralaje puede demostrarse rápidamente alineando dos lapiceros, uno a 25 cm de distancia de los ojos y otro a la longitud del brazo. Si se mueve la cabeza a cada lado de esta alineación, el lapicero que está más cerca parece que se mueve, con respecto al más distante, en sentido opuesto al de la cabeza.)

## Descripción y discusión

En los medios anisótropos, el índice de refracción varía de acuerdo con la dirección de vibración de la luz en el cristal. Por consiguiente, la indicatriz óptica para los medios anisótropos no es una esfera sino un elipsoide. De los dos tipos de indicatrices ópticas anisótropas, trataremos primero de la indicatriz uniáxica, por ser la más sencilla.

Los cristales de los sistemas hexagonal y tetragonal presentan, para luz monocromática que vibre paralela al eje *c*, un índice único de refracción que se acostumbra a simbolizar como $\epsilon$. En la figura 6-10A se ha dibujado un vector proporcional en longitud al valor de $\epsilon$, paralelo al eje *c*, para indicar esto. Por otra parte, para todas las direcciones de vibración que estén a 90° del eje *c*, los índices de refracción del cristal son todos iguales a un valor común que se ha simbolizado como $\omega$ [2]. Al construir vectores proporcionales a $\omega$ en longitud, a lo largo de esas direcciones de vibración, se obtiene un círculo de radio $\omega$ (fig. 6-10A); esta sección es siempre perpendicular al eje *c*.

Para luz que vibre formando un ángulo $\theta$ de valor cualquiera, con el eje *c* (fig. 6-10A), el cristal presenta un índice que será de valor intermedio

(2) Otros símbolos usados a veces para $\epsilon$ y $\omega$ son:
$\epsilon$: $n_\epsilon$; $N_\epsilon$; $E$; $n_E$; $N_E$
$\omega$: $n_\omega$; $N_\omega$; $O$; $n_O$; $N_O$

entre ω y ϵ; estos índices intermedios se simbolizan como $\epsilon'$. El valor de $\epsilon'$ puede calcularse a partir de la fórmula

$$\epsilon' = \frac{\omega\,\epsilon}{\sqrt{\omega^2 \cos^2\theta + \epsilon^2 \operatorname{sen}^2\theta}} \quad \text{(Ec. 6-3)}$$

Para fines de cálculo esta ecuación puede escribirse como sigue:

$$\epsilon' = \frac{\omega}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega^2}{\epsilon^2} - 1\right)\cos^2\theta}} \quad \text{(Ec. 6-4)}$$

El plano 1 de la figura 6-10B indica, por la longitud del vector, cómo al variar $\theta$ (para una dirección de vibración), de $\theta_1$ a $\theta_3$, el índice correspondiente del cristal varía de $\epsilon'_1$ a $\epsilon'_3$. Los extremos de tales vectores contenidos

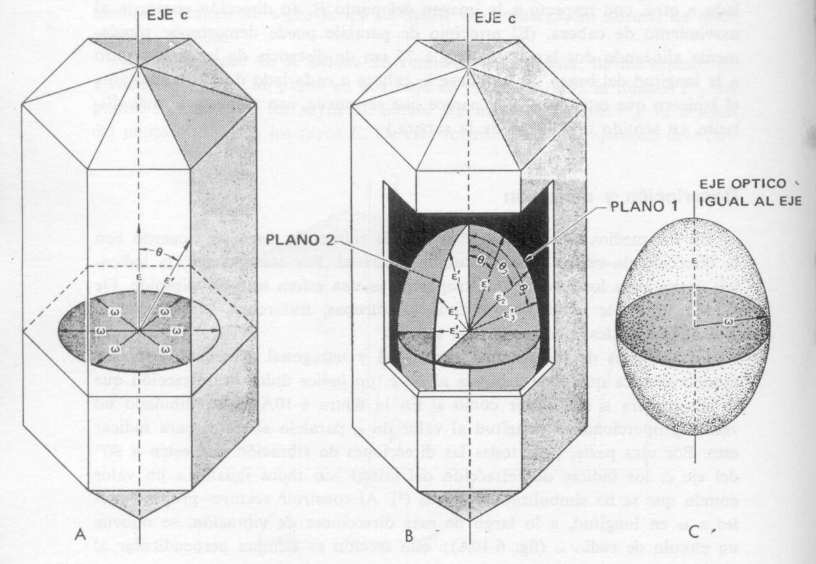



FIGURA 6-10

**(A) Relaciones angulares con el eje c de las vibraciones que corresponden a los índices ϵ, ω y uno de valor particular ϵ′. Todas las vibraciones ω yacen en el plano perpendicular al eje c. (B) La longitud de los vectores en los planos 1 y 2 indican la variación del índice ϵ del cristal para luz que vibra paralela a ellas. Sus flechas señalan elipses idénticas en todos los planos que pasan por el eje c (por ejemplo, los planos 1 y 2). (C) La indicatriz uniáxica del cristal.**

en el plano 1 caen a lo largo de una elipse (para la cual la ecuación 6-3 es la ecuación en coordenadas polares). De igual manera, en cualquier otro plano que contenga al eje cristalográfico *c* (por ejemplo el plano 2), los vectores que describen los valores $\epsilon'$, caen a lo largo de una elipse idéntica a la del plano 1. Así, la elipse del plano 1 puede girar alrededor del eje *c* coincidiendo con cualquiera de las otras elipses idénticas. Como resultado, se forma un elipsoide de rotación (fig. 6-10C). La longitud de cualquier radio de este elipsoide nos indica el índice de refracción del cristal para la luz que vibra paralela a la dirección del radio. La figura 6-10C se denomina indicatriz, o con más precisión, indicatriz uniáxica (puesto que sólo hay un eje en ella que sea perpendicular a una sección circular).

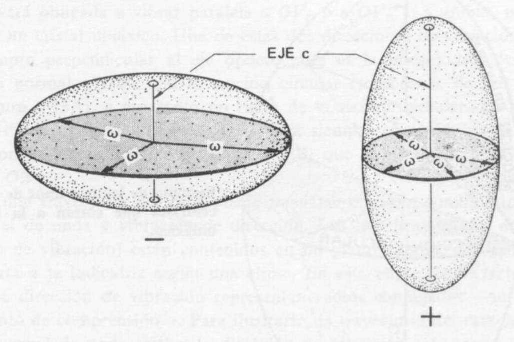



FIGURA 6-11

**Comparación de indicatrices uniáxicas positivas y negativas. La sección circular de cada una está sombreada en gris oscuro.**

Los índices $\omega$ y $\epsilon$ representan el máximo y el mínimo —o el mínimo y el máximo— de los índices de refracción que pueden medirse en un cristal tetragonal o hexagonal. Pueden considerarse como los índices principales del cristal. Los materiales uniáxicos entran naturalmente en dos categorías: uniáxicos positivos, en los cuales, por definición, el valor $(\epsilon - \omega)$ es de signo positivo, y los cristales uniáxicos negativos en los cuales $(\epsilon - \omega)$ es de signo negativo (lo que es igual $\epsilon < \omega$). Si se dibuja la indicatriz de cada uno de esos tipos de cristales, en la orientación en que se acostumbre —es decir, con el eje *c* vertical (fig. 6-11)—, la indicatriz positiva (un esferoide alargado) puede recordarse asociándola a la marca vertical de un signo +, y la indicatriz negativa (un esferoide achatado) al signo —. Nótese que sin tener en cuenta el signo, sólo hay una sección circular en la indicatriz uniáxica; su radio es siempre igual al índice principal $\omega$, y está en el plano normal al eje *c*.

## Direcciones y secciones centrales

**Terminología.** La dirección, en la indicatriz uniáxica, que coincide con el eje $c$ del cristal, se denomina *eje óptico* (la línea gruesa vertical de la figura 6-12). Refiriéndonos a ello, pueden cortarse tres tipos de secciones a través del centro de la indicatriz: 1) *un plano principal, sección principal* o *elipse principal* (esto es, una que contenga al eje óptico y que, por tanto, corte a la

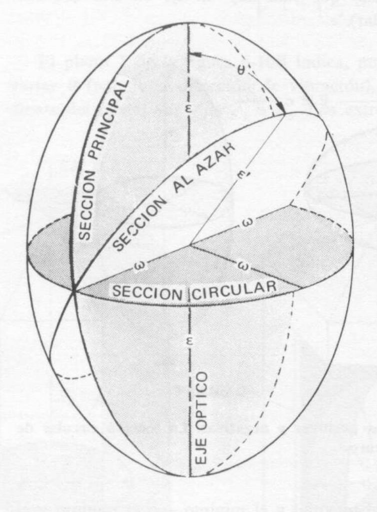



FIGURA 6-12

**Ejemplo de los tres tipos de secciones centrales que cortan a la indicatriz uniáxica.**

indicatriz según una elipse cuyos semiejes (3) sean iguales a $\epsilon$ y $\omega$); 2) la ya mencionada *sección circular* (esto es, una sección cortada normal al eje óptico), y 3) una *sección al azar* (la intersección de la indicatriz con un plano que forme con el eje óptico un ángulo ($\theta$) cualquiera). Una sección cortada al azar corta siempre a la indicatriz según una elipse, cuyos semiejes son $\omega$ y $\epsilon'$; el valor preciso de $\epsilon'$ puede calcularse a partir de la ecuación 6-4, si se conoce el valor del ángulo ($\theta$).

(3) El término semiejes se ha usado aquí refiriéndose colectivamente a los semiejes mayor y menor de una elipse. Se ha considerado conveniente incluir en el apéndice I un breve sumario de la nomenclatura, propiedades y construcción, relacionadas con las elipses y aplicable a la cristalografía óptica. Esta sección puede comprenderse bien antes de leer los próximos capítulos, puesto que trata particularmente del concepto de radios conjugados y de elipse.

## Normales de onda, trayectorias de los rayos y direcciones de vibración

Para una dirección de normal de onda tomada al azar en una indicatriz óptica (por ejemplo $OW$ en la figura 6-13A), las dos direcciones de vibración asociadas yacen en el plano normal de onda. Este plano, si se prolonga hacia fuera a partir del centro de la indicatriz, corta a la indicatriz según una elipse (punteada) cuyos ejes mayor y menor ($OV_E$ y $OV_O$) constituyen las dos únicas direcciones de vibración asociables a la normal de onda $OW$. Por consiguiente, la luz con una dirección de normal de onda cualquiera, tal como $OW$, se verá obligada a vibrar paralela a $OV_O$ o a $OV_E$, o a ambas, mientras atraviese un cristal uniáxico. Una de estas dos direcciones de vibración, $OV_O$, será siempre perpendicular al eje óptico, pues es la intersección del plano punteado normal a $OW$, con la sección circular (sombreada de gris oscuro en la figura 6-13A), y por tanto un radio de la sección circular. La segunda de estas direcciones de vibración, $OV_E$, está siempre contenida en el mismo plano (sombreado en gris en la figura 6-13B) que el eje óptico y la normal de onda $OW$.

Sólo una trayectoria del rayo puede asociarse con una combinación dada de normal de onda y vibración de dirección. Los tres (trayectoria, normal y dirección de vibración) están contenidos en un plano común, que por lo general corta a la indicatriz según una elipse. En esta elipse, la trayectoria del rayo y la dirección de vibración representan radios conjugados —un importante punto de comprensión—. Para ilustrarlo, la trayectoria del rayo asociado con la normal de onda $OW$ y la dirección de vibración $OV_E$ están también contenidas en la elipse sombreada de gris de la figura 6-13B, siendo $OR_E$ el radio conjugado de $OV_E$ en esta elipse. De igual forma, la trayectoria del rayo asociado con la normal de onda $OW$ y la dirección de vibración $OV_O$ están contenidas en la elipse no sombreada de la figura 6-13B, puesto que $OV_O$ es un semieje de esta elipse, $OR_O$, la trayectoria del rayo y el radio conjugado con él es perpendicular a $OV_O$ (4). Por tanto, $OR_O$ coincide con la normal de onda $OW$, que a su vez es siempre perpendicular a la dirección de vibración $OV_O$. Así, el rayo $OR_O$, puesto que vibra perpendicular y coincide en la trayectoria con su dirección de normal de onda, es un rayo ordinario y obedece a la ley de Snell. El rayo $OR_E$, sin embargo, no está de acuerdo con esto, es un rayo extraordinario cuya trayectoria no obedece a la ley de Snell. El significado de los subíndices $_E$ y $_O$ usados en las anteriores explicaciones (y en las que seguirán), se hace evidente. El subíndice $_E$ se refiere a la dirección de vibración y a la trayectoria del rayo extraordinario; el subíndice $_O$ a las del rayo ordinario.

La trayectoria del rayo y la dirección de la normal de onda de la luz, en

(4) El radio conjugado de un semieje de una elipse es el otro semieje; los semiejes constituyen por tanto el único par de radios conjugados, pero perpendiculares entre sí, en una elipse. El lector podrá confirmarlo por sí mismo.

un cristal uniáxico, coinciden sólo si su dirección de vibración asociada es paralela o perpendicular al eje óptico. Una dirección de vibración orientada así corresponderá a un eje principal, ω o ε. Por consiguiente, esta dirección de vibración será de radio más o menos largo (esto es, un semieje) para todas las secciones transversales elípticas de la indicatriz en las cuales está contenida. El caso para una dirección de vibración que es perpendicular al eje óptico, ya ha sido explicado, la dirección de vibración $OV_O$ en la figura 6-13B fue asociada con una trayectoria del rayo ($OR_O$) y una normal de onda ($OW$) que coinciden en dirección.

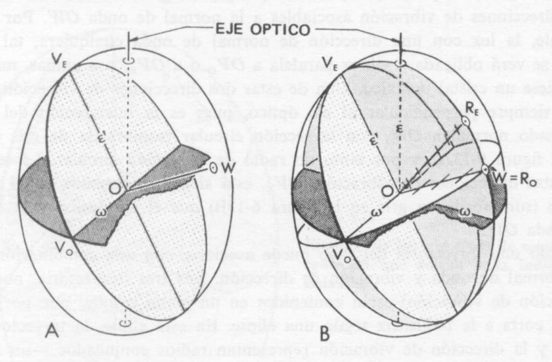



FIGURA 6-13 A-B

**(A) Relación de una normal de onda al azar OW, con las dos únicas direcciones de vibración $OV_O$ y $OV_E$ que se asocian con ella. El plano punteado perpendicular a OW corta la indicatriz según una elipse de la cual $OV_O$ y $OV_E$ son semiejes. (B) Colocación de $OR_E$, la única trayectoria del rayo asociable con OW y $OV_E$. Las tres están en el mismo plano (sombreado gris). De igual forma, la trayectoria del rayo $OR_O$, la única trayectoria asociable con OW y $OV_O$, está contenida en el mismo plano (no sombreado) que ellos; $OR_O$ coincide con OW en este caso. En ambas, (A) y (B), la sección circular está sombreada en gris oscuro.**

Las relaciones de dirección de las trayectorias de los rayos y de las direcciones de vibración con las normales de onda que están a ángulos especiales de 90° ó 0° del eje óptico, pueden determinarse de forma similar a la empleada para una normal de onda cualquiera. Por ejemplo, si la normal de onda $OW$ está a 90° del eje óptico (fig. 6-13C), las dos direcciones de vibración son $OV_O$ y $OV_E$ (para las que los índices son ω y ε respectivamente). Sin embargo, aunque de forma diferente al caso al azar, la trayectoria del rayo $E$ coincide también ahora con su normal de onda asociada $OW$ (puesto que su dirección de vibración $OV_E$ y normal de onda $OW$ son radios conjugados en la elipse sombreada de gris). Por otra parte, si la normal de onda dada coincide con el eje óptico (fig. 6-13D), la sección de la indicatriz perpendicular a $OW$ es una sección circular. Por consiguiente, no hay direc-

ciones perpendiculares privilegiadas asociables con esta normal de onda; además, una onda que se traslade a lo largo del eje óptico puede vibrar paralela a cualquiera de los innumerables radios de la sección circular —o a todos ellos si el rayo incidente no estaba polarizado—. Sólo el índice ω puede asociarse con este rayo, y su trayectoria coincide con la normal de onda *OW*. La coincidencia de la trayectoria del rayo y de la normal de onda, para cada vibración en la figura 6-13D se puede comprender fácilmente si se dibuja una elipse principal (en sombreado gris) a través de una de ellas (por ejemplo $OV_O$). Ahora es obvio que $OV_O$ y *OW* son semiejes, y por tanto radios conjugados de la elipse; consecuentemente *OW*, representa la trayectoria del rayo, a la vez que la dirección de la normal de onda.

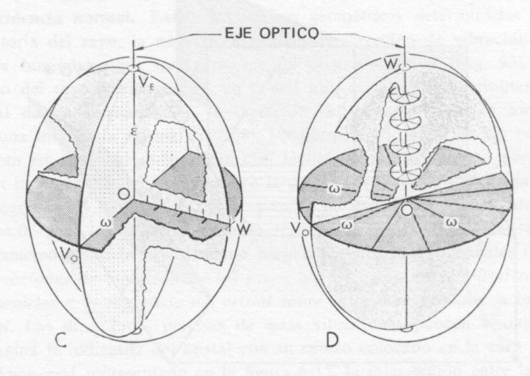



FIGURA 6-13 C-D

**(C) Relación de las direcciones de vibración ($OV_O$ y $OV_E$) y de las trayectorias de los rayos (éstas coinciden con OW) con OW, una normal de onda perpendicular al eje óptico. Nótese la coincidencia de las trayectorias de los rayos O y E. (D) Relación de las direcciones de vibración (que son todos los radios de la sección circular fuertemente sombreada) y la trayectoria del rayo (coincidente con OW) con una normal de onda, OW, paralela al eje óptico. En ambas (C) y (D) la sección circular está sombreada en gris oscuro.**

En resumen puede deducirse de la figura 6-13B que con respecto a la normal de onda que forme un ángulo al azar con el eje óptico, cualquiera de las dos vibraciones mutuamente perpendiculares, y por tanto, cualquiera de las dos trayectorias del rayo, pueden estar asociadas. Ambas trayectorias posibles están contenidas en el plano principal que contiene la normal de onda (sombreado en gris en la figura 6-13B). Uno de estos rayos, el rayo *O*, vibra normal al plano principal; el segundo, el rayo *E*, vibra en el plano principal a lo largo del radio de la elipse que es conjugado con la trayectoria de este rayo.

## Aplicación de la incidencia de la luz en las superficies cristalinas

**Tipos de incidencia.** Un rayo de luz que penetra en un cristal uniáxico define un plano de incidencia (véase pág. 20) que es paralelo o forma un ángulo con el eje óptico del cristal. Los rayos 1 y 2 de la figura 6-14 ilustran el primer caso; ambos están contenidos en un plano de incidencia paralelo al eje óptico. El rayo 1 está más especializado puesto que coincide con

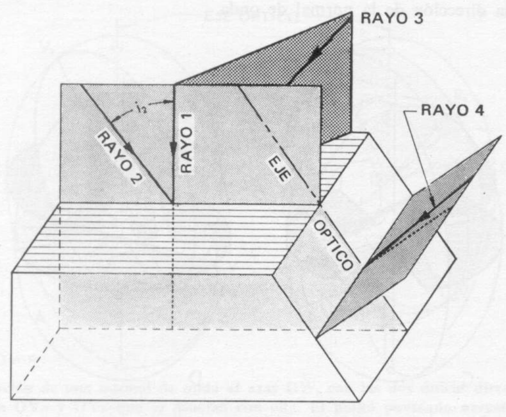



FIGURA 6-14

**Los distintos tipos de relaciones angulares entre el eje óptico de un cristal uniáxico y los planos de incidencia definidos por rayos de luz que penetran en él. El plano de incidencia ligeramente sombreado que contiene a los rayos 1 y 2 es paralelo al eje óptico. El plano de incidencia muy sombreado que contiene al rayo 3 representa el caso general, formando un ángulo distinto de 0° ó de 90° con el eje óptico. El plano de incidencia moderadamente sombreado, que contiene al rayo 4, está a 90° del eje óptico; este ángulo recto puede darse exclusivamente para incidencia sobre una superficie del cristal paralela al eje óptico. Las normales a las caras del cristal están punteadas.**

la normal a la superficie del cristal, por tanto representa lo que se denomina el caso de *incidencia normal* sobre la superficie del cristal. El rayo 2, por otra parte, forma un ángulo $i_2$ con la normal. El rayo 3 representa el caso más general, ya que define un plano de incidencia (fuertemente sombreado) que está formando ángulo con el eje óptico del cristal. Sólo si el eje óptico es paralelo a la cara del cristal sobre la que se da la incidencia, el ángulo entre el plano de incidencia y el eje óptico puede ser de 90° (véase el plano de incidencia que contiene al rayo 4 en la figura 6-14).

Los rayos 1, 2, 3 y 4, después de penetrar en el cristal, formarán generalmente un rayo *E* y un rayo *O* que se trasladarán dentro del cristal según diferentes trayectorias. En los cuatro casos, la trayectoria del rayo *O* puede determinarse fácilmente puesto que: 1) siempre está contenido en el plano de incidencia, y 2) sigue la ley de Snell. La trayectoria del rayo *E* es más difícil de determinar para el rayo 3, algo menos para el rayo 2, y más simple para el rayo 4, y para la incidencia normal que representa el rayo 1. En este trabajo, el método de localización de la trayectoria de *E* se tratará sólo en casos representados por el rayo 1 (caso de incidencia normal), por el rayo 2 y por el rayo 4. El caso de incidencia normal es, en particular, más importante de comprender en la práctica rutinaria de óptica cristalográfica, y se tratará por tanto con el máximo detalle.

**Incidencia normal.** Existen relaciones geométricas determinadas entre la trayectoria del rayo, la normal de onda y la dirección de vibración de una energía luminosa dada que atraviese un cristal uniáxico (pág. 93). Así, el camino del rayo refractado en un cristal uniáxico puede determinarse si su normal de onda asociada y su dirección de vibración pueden localizarse. Para una incidencia normal ($i = 0°$), las normales de onda de los rayos que penetran en el cristal se localizan con facilidad, puesto que son perpendiculares a la superficie del mismo sobre la cual se produce la incidencia (puesto que, según la ley de Snell, si $i = 0°$ para la normal de onda incidente, entonces $r = 0°$ para las normales de onda refractadas). Por tanto, a causa de que las vibraciones son invariablemente perpendiculares a las normales de onda, *las direcciones de vibración de los rayos que penetran en el cristal son siempre paralelas a la superficie del cristal sobre la cual se produce la incidencia normal.* Las direcciones precisas de estas vibraciones pueden visualizarse si se imagina la indicatriz del cristal con su centro colocado en la cara del mismo. Como está representado en la figura 6-15, la intersección entre la indicatriz y la cara del cristal es, o una elipse (véanse las caras *m* y *q*) o un círculo (véase la cara *c*), según cual sea el ángulo entre la cara y el eje óptico. Si la intersección es una elipse, sus semiejes marcan las direcciones de vibración después de su entrada en el cristal, de una luz que incida normalmente sobre la cara. Si la intersección es un círculo, no existen direcciones privilegiadas; así, como ocurre en los medios isótropos, la luz que incide normalmente a esta cara, vibrará después de penetrar en el cristal en la misma dirección (S) que lo hizo antes de entrar.

La figura 6-15 demuestra que se puede permitir el dibujar la indicatriz en *cualquier* lugar dentro (o fuera) del cristal siempre que su eje óptico se mantenga paralelo al eje *c* del cristal. De esta forma la indicatriz tiene una orientación específica en el cristal, pero no una colocación determinada.

*Sección perpendicular al eje óptico.* Una sección cortada perpendicularmente al eje óptico, de un cristal uniáxico (plano *c* en la figura 6-15), corta a la indicatriz según un círculo de radio $\omega$. La situación es en este caso semejante a la descrita con anterioridad para la sección isótropa (pág. 83) o, lo que es igual, la luz que penetra en el cristal puede considerarse que vibra sin ninguna preferencia dentro del cristal, paralela a cualquier o a todos los ra-

dios del círculo de intercesión. Por consiguiente, la luz no polarizada que incide normal a la placa, permanecerá sin polarizar (por ejemplo, el rayo *BB′* en la figura 6-16), mientras que un rayo polarizado plano (por ejemplo, *CC′* en la misma figura) conservará su misma dirección de polarización ([5]). Así, de igual manera que las láminas isótropas (y por las mismas razones), esta

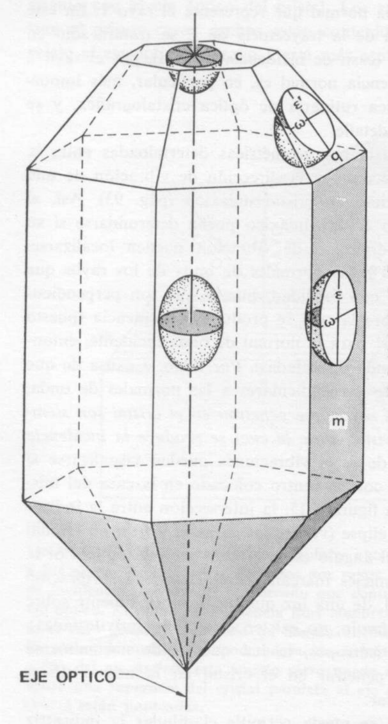



FIGURA 6-15

**Tipos de intersección entre las caras de un cristal y su indicatriz. Los radios marcados de la elipse (o círculo) indican las direcciones privilegiadas del cristal para luz que penetra por incidencia normal en esta cara.**

placa vista entre nicoles cruzados permanecerá extinguida, aunque se observe durante una rotación entera de la platina, en particular si el diafragma que hay bajo la misma se ha dejado con una pequeña apertura.

La analogía entre esta sección particular y la placa isótropa puede llevarse aún más lejos puesto que ambas carecen de birrefringencia; tienen un solo índice, ω, para la luz que incide normalmente. (Todos los demás tipos de secciones de la indicatriz, que pronto veremos, presentan birrefringencia.)

([5]) La posibilidad de polarización rotatoria se desprecia aquí.

Aún más, los rayos *BB′* y *CC′* actúan como rayos ordinarios puesto que coinciden con sus direcciones de normal de onda (o, dicho de otra forma, puesto que sus direcciones de vibración asociada son perpendiculares a su trayectoria). Así estos rayos siguen la ley de Snell aun en su forma más sencilla. Tales fenómenos, que parecen isótropos, se observan en los cristales

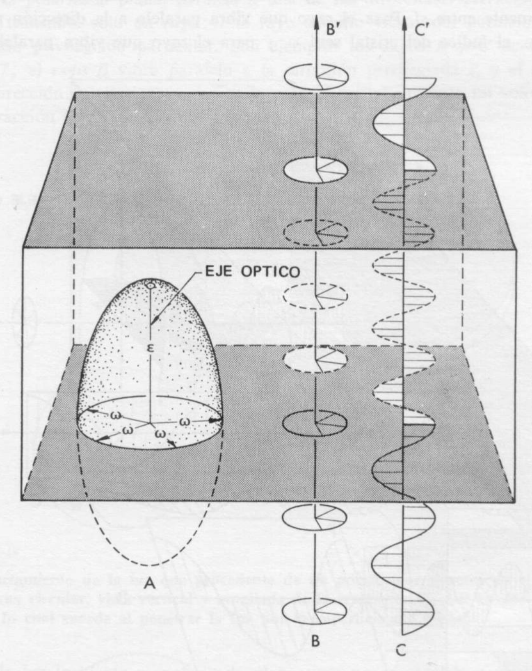



FIGURA 6-16

**Incidencia normal de la luz sobre la superficie inferior de un cristal cortado perpendicularmente al eje óptico. La orientación de la indicatriz óptica del cristal en esta cara, se ve en A. Está representado el paso a través del cristal de un rayo no polarizado BB′ y de uno polarizado CC′.**

uniáxicos siempre que el rayo se traslade a lo largo del eje óptico (es decir del eje *c*) del cristal. Por esta razón, el eje óptico se denomina *eje de isotropía.*

*Sección paralela al eje óptico.* En este caso (fig. 6-17) la indicatriz uniáxica, si está centrada en el plano que limita el cristal, corta a este plano según una elipse cuyos semiejes mayor y menor son iguales a $\epsilon$ y $\omega$, los dos extremos del índice de refracción (es decir, los índices principales) que puede presentar

un cristal uniáxico. Estos dos ejes representan las dos direcciones perpendiculares entre sí (las direcciones privilegiadas), paralela a las cuales la luz está obligada a vibrar cuando atraviese el cristal. Por consiguiente, un rayo de luz no polarizado que incida normalmente en la sección (*A* en la figura 6-17) se descompondrá, después de su entrada, en dos rayos diferentes. Se trasladarán en este caso, a lo largo de un camino común, pero vibrarán perpendicularmente entre sí. Para el rayo que vibra paralelo a la dirección privilegiada ω, el índice del cristal será ω, y para el rayo que vibra paralelo a la

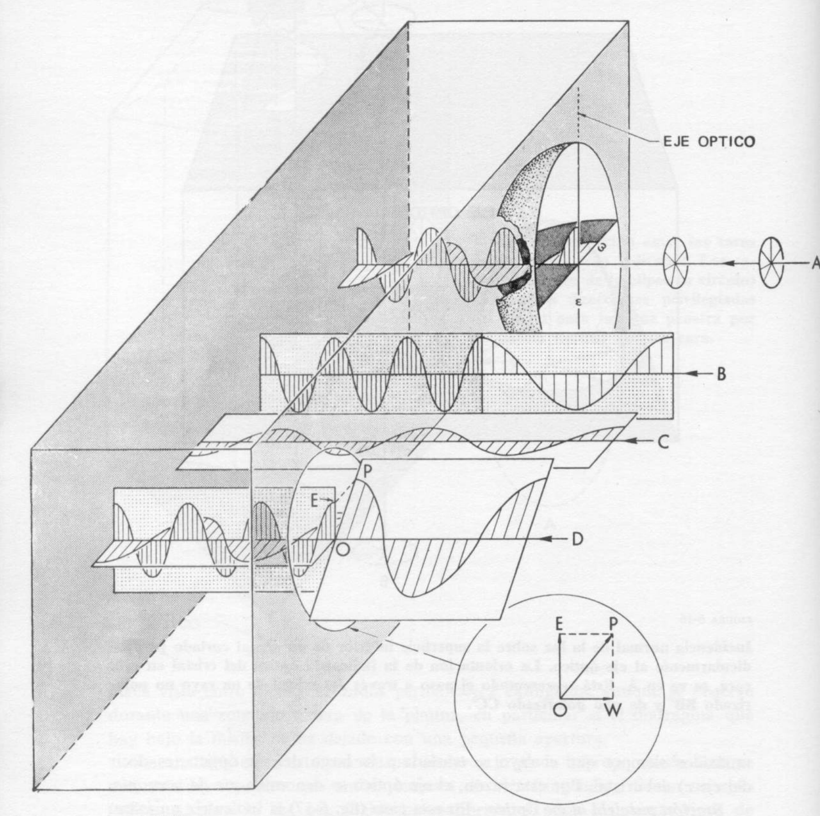



FIGURA 6-17

**Incidencia normal de un rayo no polarizado, A, de rayos polarizados B, C y D en una cara del cristal paralela al eje óptico. Diagrama circular; vista frontal, ampliada, del comportamiento del vector OP después de penetrar en el cristal.**

dirección privilegiada $\epsilon$, el índice del cristal será $\epsilon$. Así, esta sección es birrefringente, ya que tiene dos índices de refracción diferentes $\epsilon$ y $\omega$.

La luz polarizada plana que incide normalmente sobre este cristal se verá afectada de diferente forma de acuerdo con el ángulo que haya entre su plano de polarización y las direcciones privilegiadas de la sección. Si la luz incidente es polarizada plana, paralela a una de las direcciones privilegiadas, el cristal transmite sólo un rayo; este rayo sencillo vibra sólo paralelo a esta dirección privilegiada particular. Son ejemplos los rayos *B* y *C* de la figura 6-17; el rayo *B* vibra paralelo a la dirección privilegiada $\epsilon$, y el rayo *C* a la dirección privilegiada $\omega$, en cada caso el cristal presenta un solo índice de refracción ($\epsilon$ para el rayo *B* y $\omega$ para el rayo *C*).

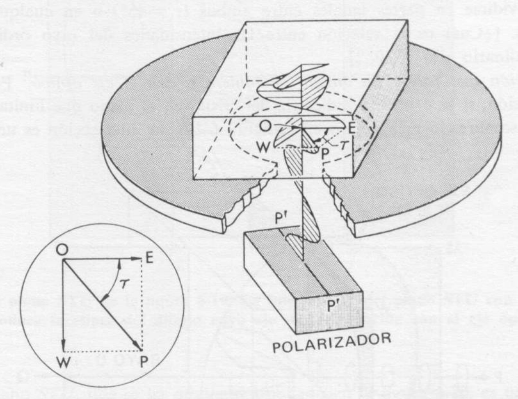



FIGURA 6-18

**Comportamiento de la luz que procedente de un polarizador penetra en el cristal. Diagrama circular, vista vertical y ampliada de la resolución de OP en dos componentes lo cual sucede al penetrar la luz por la superficie del cristal.**

Si la luz incidente es polarizada plana pero no es paralela a ninguna dirección privilegiada (rayo *D* en la figura 6-17), ésta se descompone vectorialmente en dos rayos después de penetrar en el cristal, vibrando cada rayo paralelo a una dirección privilegiada. La figura 6-18 representa con mayor detalle la descomposición de la amplitud de la luz incidente (*OP*), en dos amplitudes (*OE* y *OW*) asociables a esos dos rayos. Las magnitudes relativas de estas amplitudes son:

$$OE = OP \cos \tau$$

$$OW = OP \operatorname{sen} \tau$$

donde $\tau$ (tau) se define como el ángulo entre *OP* y la dirección privilegiada *OE* para el rayo extraordinario, dentro del cristal.

La intensidad de la luz de un rayo es proporcional al cuadrado de su amplitud. Así en la figura 6-18

$I$ es proporcional a $OP^2$
$I_E$ es proporcional a $OP^2 \cos^2 \tau$
$I_O$ es proporcional a $OP^2 \operatorname{sen}^2 \tau$

donde $I$, $I_E$ e $I_O$ representan respectivamente las intensidades de los rayos incidentes, extraordinarios y ordinarios. Como puede verse en la figura 6-18, la platina giratoria de un microscopio polarizante permite a $\tau$ variar desde 0° a 90°. Como consecuencia, toda la energía luminosa incidente puede concentrarse alternativamente en el rayo extraordinario o en el rayo ordinario, o bien dividirse en partes iguales entre ambos ($\tau = 45°$) o en cualquier proporción. [¿Cuál es la relación entre las intensidades del rayo ordinario y extraordinario si $\tau = 30°$?]

*Sección que forme un ángulo cualquiera θ con el eje óptico.* Para esta orientación, si se centra la indicatriz del cristal en el plano que limita al mismo (el sombreado más oscuro en la figura 6-19), su intersección es una elipse

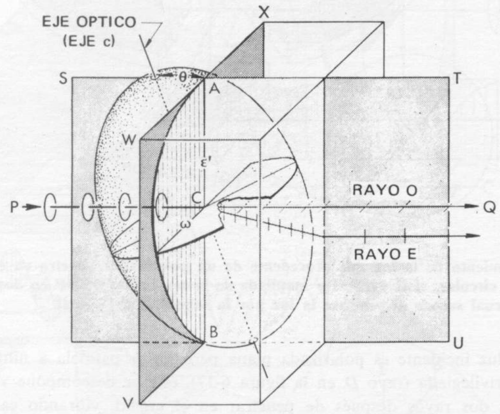



FIGURA 6-19

**Incidencia normal de un rayo de luz no polarizada, PC, en una sección al azar, XWV de un cristal uniáxico. Nótese su bifurcación dentro del cristal en los rayos E y O, cada uno de ellos contenido en el plano STU. El rayo PC y el eje óptico del cristal yacen también en el plano STU.**

(rayada verticalmente) cuyos ejes mayor y menor marcan dos direcciones privilegiadas, que corresponden a los índices $\omega$ y $\epsilon'$ de la sección del cristal. Como se ha visto, el rayo de luz no polarizado *PC*, que incide normalmente, se divide en un rayo *O* y otro *E*, que vibran paralelos a las direcciones pri-

vilegiadas $\omega$ y $\epsilon'$, respectivamente. Estas dos trayectorias de los rayos, para incidencia normal, están contenidas en el mismo plano principal (*STU* en la figura 6-19). Este plano contiene también: 1) el rayo que incide normalmente, 2) el eje óptico del cristal, y 3) la dirección privilegiada del cristal $\epsilon'$ (o $\epsilon$); estas tres direcciones son siempre coplanarias; por consiguiente, es fácil definir este plano si se conocen dos de las tres direcciones.

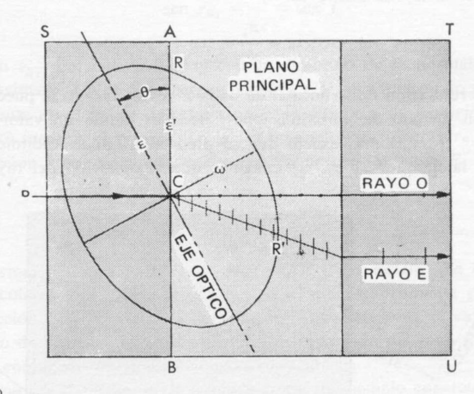



FIGURA 6-20

**Vista del plano STU de la figura 6-19. La intersección del plano STU con la indicatriz produce la elipse del dibujo cuyo eje mayor coincide con el eje óptico del cristal.**

El plano *STU*, que se ha dibujado ampliado en la figura 6-20, es un plano clave para la determinación gráfica de la trayectoria del rayo *E* y el valor preciso de $\epsilon'$ para su vibración asociada. Para hacer esto, uno debe conocer los valores reales de $\epsilon$, $\omega$ y $\theta$; el último es el ángulo entre el eje óptico del cristal y la cara del cristal sobre la que incide el rayo. Los detalles de la construcción para la figura 6-20 (y soluciones gráficas similares), son: 1) construir una elipse con $\epsilon$ y $\omega$ dibujados a escala en los semiejes, para representar la intersección entre el plano *STU* y la indicatriz en la figura 6-19; 2) a través de su centro y formando un ángulo $\theta$ con el semieje $\epsilon$ (el eje óptico del cristal), dibujar la línea de intersección *AB*, en la figura 6-19, entre el plano *STU* y la superficie del cristal *VWX*; 3) dibujar perpendicular a AB el rayo normal incidente y prolongarlo dentro del cristal para obtener la trayectoria del rayo *O*; las vibraciones asociadas del rayo *O*, puesto que siempre son perpendiculares al plano principal, se representan como puntos; 4) *CR*, el radio de la elipse que es paralelo a *AB*, representa a la vez la dirección de vibración y, por su longitud, el índice de refracción $\epsilon'$ para el rayo *E*, y, 5) dibujar los radios conjugados de *CR* (véase apéndice I) para obtener *CR'*, la trayectoria del rayo *E*.

**Otros tipos de incidencia.** A continuación vamos a tratar un caso semejante al del rayo 2 de la figura 6-14, donde el rayo incidente está contenido en un plano principal pero no es perpendicular a la superficie del cristal. Una vista de una sección transversal a lo largo del plano principal (fig. 6-21) nos muestra cómo el rayo incidente *RC* se divide en un rayo *O* y un rayo *E*. El ángulo de refracción para la trayectoria del rayo *O* (es decir, $r_o$), se determina fácilmente por la ley de Snell; así

$$\text{sen } r_o = \frac{n_i}{\omega} = \text{sen } i$$

El ángulo de refracción de la normal de onda *E* (es decir, $r_E$), se puede determinar por un método de aproximaciones sucesivas dando un valor a cada paso ($r_{E_1}$, $r_{E_2}$, ..., $r_{E_n}$) más exacto que su predecesor. El procedimiento que se señala en la figura 6-21 es: 1) imaginar que la dirección del rayo *O* ya

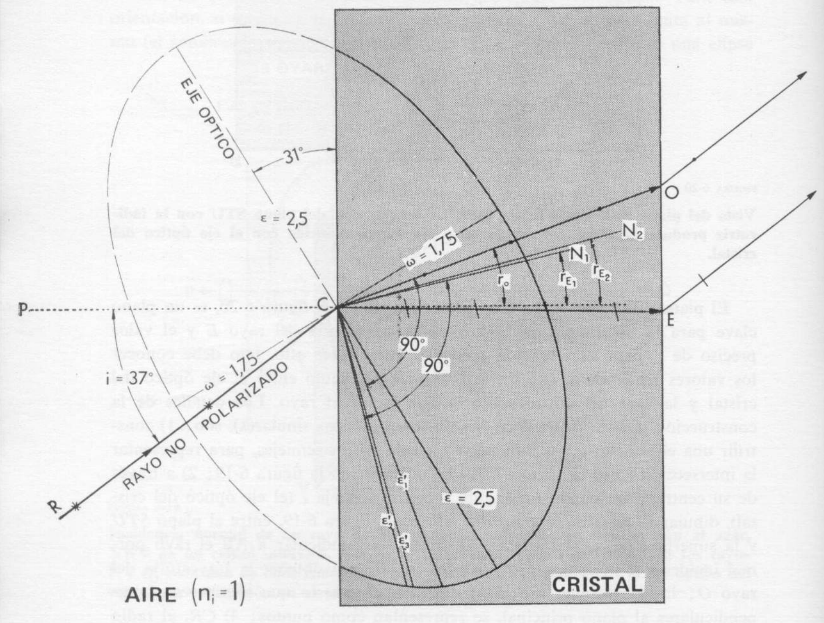



FIGURA 6-21

**Método para determinar las trayectorias de los rayos refractados, si los rayos no polarizados de la figura 6-19 incidieran oblicuamente (pero siempre en el plano STU). Todas las trayectorias de los rayos están de nuevo contenidas en el plano STU, que se muestra aquí con detalle.**

conocida (*CO*) representa también la normal de onda *E* (en realidad no es así); 2) trazar una perpendicular en *C* a *CO* para determinar $\epsilon'_1$, índice de refracción (y dirección de vibración), que pueda asociarse con una normal de onda *E*; 3) sustituir este valor $\epsilon'_1$, en la ley de Snell, para obtener $r_{E_1}$, una aproximación más cercana al ángulo de refracción de la normal de onda *E*; así,

$$\text{sen } r_{E_1} = \frac{n_i}{\epsilon'_1} = \text{sen } i$$

4) usando $r_{E_1}$, obtenido así, proyectar la dirección de la normal de onda *E* más aproximada, $CN_1$; 5) la perpendicular a $CN_1$ desde el punto *C* determina gráficamente $\epsilon'_1$, el índice de refracción (y la dirección de vibración) asociado a $CN_1$; 6) sustituir el valor $\epsilon'_2$ en la ley de Snell para obtener $r_{E_2}$, un ángulo de refracción aún más aproximado para la normal de onda *E*, que $r_{E_1}$, así

$$\text{sen } r_{E_2} = \frac{n_i}{\epsilon'_2} = \text{sen } i$$

7) la normal de onda localizada así ($CN_2$) es más exacta que $CN_1$. Así la perpendicular a $CN_2$ desde el punto *C* determina gráficamente $\epsilon'_3$, un índice de refracción (y una dirección de vibración) que está muy cercana del valor verdadero de la onda refractada *E*, y 8) la trayectoria del rayo *E* es entonces el radio conjugado de la dirección de vibración $\epsilon'_3$.

La figura 6-21 puede servir también como un ejemplo concreto. Imagínese que la sección del cristal hubiese sido cortada según un ángulo de 31° con el eje óptico y que el rayo *IC* incide sobre la placa con un ángulo de 37°. Si la placa está en el aire —es decir, que $n_i = 1{,}0$— y $\omega$ y $\epsilon$ tienen los valores señalados en la figura, los valores numéricos obtenidos, para cada una de las etapas anteriores numeradas en el párrafo anterior, son: 1) $r_o = 20°\ 07'$; 2) $\epsilon'_1 = 2{,}445$; 3) $r_{E_1} = 14°\ 12'$; 4) $\epsilon'_2 = 2{,}398$; 5) $r_{E_2} = 14°\ 32'$, y 6) $\epsilon'_3 = 2{,}401$. Una sustitución posterior de $\epsilon'_3$ en la ley de Snell nos da $r_{E_3} = 14°\ 31'$, que es un valor cuya diferencia no se aprecia con $r_{E_2}$. En general, $r_{E_2}$ es lo suficientemente exacto para la mayoría de las determinaciones. El lector puede, si lo quiere, comprobar el método empleando una escala gráfica tan grande como sea posible.

El caso más generalizado de incidencia de rayo, en el que el plano de incidencia forma un ángulo cualquiera con el eje óptico (por ejemplo, el rayo 3 en la figura 6-14), es demasiado difícil y enrevesado de explicar. Sin embargo, si el ángulo entre el plano de incidencia y el eje óptico es de 90°, el caso queda reducido a una representación muy simple, como puede verse en la figura 6-22. Aquí, un rayo incidente, no paralizado, *IO*, se divide después de entrar en el cristal en un rayo *O* y un rayo *E*. La trayectoria del rayo *O* se obtiene fácilmente por la ley de Snell: así,

$$n_i \text{ sen } i = \omega \text{ sen } r_O \qquad \text{(Ec. 6-5)}$$

La dirección de vibración del rayo *O* está definida puesto que: 1) debe ser

perpendicular al eje óptico (y por tanto estar contenido en el plano sombreado de incidencia de la figura 6-22), y 2) debe ser también perpendicular a la trayectoria del rayo *O* en este plano. En común con la trayectoria del rayo *O*, la del rayo *E* debe también estar contenida en el plano de incidencia (como debe sucederles a todas las trayectorias de los rayos refractados). Su dirección de vibración coincide con la dirección del eje óptico y su correspondiente índice de refracción es por tanto $\epsilon$. Esta dirección de vibración (dibujada en la superficie superior de la placa) es, por tanto, perpendicular al plano de incidencia, y, por consiguiente, a la trayectoria del rayo *E*. Puesto

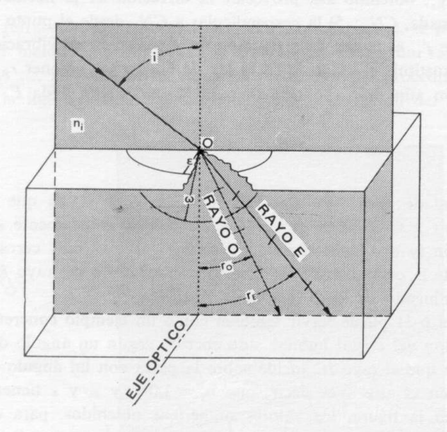



FIGURA 6-22

**Las trayectorias de los rayos refractados E y O cuando un rayo no polarizado, IO, incide en un plano (sombreado) perpendicular al eje óptico del cristal. El cristal es uniáxico negativo. Para un cristal uniáxico positivo, $r_E$ debería ser menor que $r_O$, y el rayo E formaría entonces un ángulo menor con la normal a la cara del cristal (línea de puntos).**

que la luz que compone este rayo *E* vibra perpendicularmente a su trayectoria, el rayo *E* se comporta de forma diferente (a un rayo *E*) al seguir su trayectoria la ley de Snell (véanse págs. 87-88). Así podemos determinar $r_E$, el ángulo de refracción para ambos, trayectoria y normal de onda a partir de una simple ecuación de la ley de Snell

$$n_i \text{ sen } i = \epsilon \text{ sen } r_E \qquad \text{(Ec. 6-6)}$$

Puesto que los términos de la parte derecha de las ecuaciones 6-5 y 6-6 pueden igualarse, obtenemos

$$\frac{\omega}{\epsilon} = \frac{\text{sen } r_E}{\text{sen } r_O}$$

Para cristales uniáxicos negativos ($\omega > \epsilon$), por tanto, $\angle r_E$ es mayor que $\angle r_O$, como en el caso de la figura 6-22. Si el cristal de la figura 6-22 fuese uniáxico positivo ($\epsilon > \omega$), entonces $\angle r_O$ sería mayor que $\angle r_E$.

## RESUMEN

**1.** La indicatriz óptica indica cómo cambian en un cristal los índices de refracción con la dirección de vibración.

**2.** La indicatriz isótropa es esférica, indicando que los materiales isótropos presentan el mismo índice de refracción sea cual sea la dirección de vibración de la luz.

**3.** Para los cristales uniáxicos la indicatriz es un esferoide alargado (cristales positivos), o un esferoide oblongo (cristales negativos).

**4.** Todas las secciones centrales que cortan la indicatriz son, excepto una, elipses.

**5.** La única excepción es una sección circular.

**6.** La dirección normal a la sección circular se denomina eje óptico. Este eje óptico coincide siempre con el eje *c* de los cristales hexagonales y tetragonales.

**7.** Una sección principal de la indicatriz es la que contiene al eje óptico. La elipse así formada tendrá siempre semiejes iguales a $\epsilon$ y $\omega$.

**8.** El rayo *O* siempre vibra *perpendicular* al plano principal que contiene su trayectoria.

**9.** El rayo *E* siempre vibra *dentro* del plano principal que contiene su trayectoria.

**10.** En este plano principal, la trayectoria del rayo *E* no es necesariamente perpendicular a su dirección de vibración. Por el contrario, su trayectoria y direcciones de vibración son radios conjugados de la elipse que se forman en la intersección de este plano principal con la indicatriz uniáxica.

**11.** Una dirección de una normal de onda es siempre perpendicular a sus direcciones asociadas.

**12.** La dirección de onda *O* y la trayectoria del rayo *O* coinciden siempre.

**13.** La normal de onda *E* y la trayectoria del rayo *E,* por lo general, no coinciden.

**14.** Las dos posibles direcciones asociadas a una normal de onda forman entre sí un ángulo recto.

**15.** Dada una normal de onda, sus direcciones de vibración asociadas están contenidas en el plano perpendicular a ella. Este plano corta a la indicatriz según una elipse, cuyos ejes mayor y menor representan las dos únicas direcciones privilegiadas (es decir, las direcciones de vibración posibles) que pueden asociarse con la normal de onda dada.

**16.** Si este plano corta a la indicatriz según un círculo, no existen direcciones privilegiadas con respecto a la normal de onda dada.

**17.** Para los cristales anisótropos, la ley de Snell debe reformarse para

aplicarla a las direcciones de las normales de onda, más que a las trayectorias de los rayos.

**18.** Para que la luz que penetra en una placa de un cristal uniáxica, que está en el aire, incidiendo normalmente sobre ella, las direcciones de vibración son paralelas a la superficie del cristal, antes y después de la entrada (véase la ley de Snell reformada).

**19.** Más específicamente, las vibraciones después de entrar son paralelas a uno o a ambos semiejes de la elipse que se forma por intersección de la superficie plana del cristal con la indicatriz uniáxica, prolongando la superficie hacia fuera a partir del centro de la indicatriz.

# 7

# La interferencia de la luz

## ONDAS POLARIZADAS EN EL MISMO PLANO

Hemos descrito las ondas luminosas como ondas transversales (véase página 16). De esta forma, la energía luminosa circula a lo largo de su camino en un medio dado debido a las vibraciones de las partículas en ese medio, siendo las vibraciones perpendiculares a la trayectoria que sigue la energía. La figura 7-1A representa, en esencia, la fotografía del movimiento de una onda polarizada plana, que se propaga a lo largo de *OP*; las flechas perpendiculares a *OP* representan los desplazamientos vibratorios (a partir de sus posiciones originales de reposo en *OP*) de unas pocas partículas que forman parte activa en la transmisión de la luz. Las partículas del mismo tren de ondas están «en fase» si en cualquiera y en todo instante se desplazan siempre de su posición de reposo con la misma dirección y amplitud. Así, en la figura 7-1A, los puntos $a_1$, $a_2$ y $a_3$ están todos en fase; igual sucede con los puntos $b_1$, $b_2$ y $b_3$. Partículas tales como $a_1$ y $b_1$ cuyos desplazamientos vibratorios son iguales, pero opuestos en dirección, están precisamente «fuera de fase». Los puntos $b_1$ y $c_1$ no están en fase, pues en un tiempo ligeramente posterior sus desplazamientos serán desiguales.

La distancia entre dos puntos dentro de la misma trayectoria de la onda se conoce como «diferencia de trayectoria» y se representa como $\Delta$. Puesto que es una distancia, puede expresarse en cualquier unidad de longitud adecuada; a menudo, sin embargo, es conveniente expresarlo en términos referentes a la longitud de onda de la luz empleada. Encontramos entonces que la distancia entre todos los puntos que están en fase (por ejemplo, $a_1$ y $a_3$ en la figura 7-1A) es siempre un número entero de longitudes de onda —es decir, 0, $1\lambda$, $2\lambda$, ..., o $n\lambda$—, mientras que entre todos los puntos que están fuera de fase la distancia será (por ejemplo entre $a_1$ y $b_2$),

$$\frac{1}{2}\lambda, \frac{3}{2}\lambda, \ldots, \text{ó } \frac{2n+1}{2}\lambda$$

Las diferencias de trayectoria entre dos puntos que no están ni en fase ni fuera de fase, serán distintas de los anteriores valores. De esta forma la di-

ferencia de trayectoria entre dos puntos, si se expresa en longitudes de onda, nos aclara si estos puntos están en fase o fuera de fase.

En la figura 7-1B, una «fotografía» tomada un instante después que la figura 7-1A, la onda original (de longitud $r_1$) se ha desplazado hacia la derecha, y la onda segunda, de igual longitud de onda pero de amplitud $r_2$, ha penetrado por la izquierda. La diferencia de trayectoria entre los frentes de estas dos ondas es ahora $3\frac{5}{8}\lambda$. Las dos ondas están, pues, más cerca de la posición de fuera de fase que de la de en fase (puesto que $3\frac{5}{8}$ está más cer-

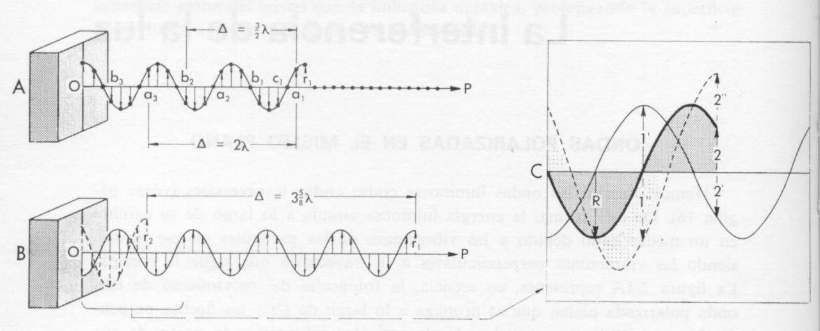



FIGURA 7-1

**(A) Transmisión de una onda luminosa polarizada plana de amplitud $r_1$, procedente de O y que se dirige a P por medio de un desplazamiento transversal de partículas (puntos negros) a partir de su posición de reposo en OP. (B) Una «fotografía» similar tomada un instante después. Una segunda onda, de amplitud $r_2$ ha penetrado por la izquierda desplazándose desde O hacia P. (C) Detalle agrandado de (B) para enseñar la interacción de estas dos ondas coincidentes para producir un movimiento ondulatorio resultante de amplitud R.**

cano de $3\frac{1}{2}$ que de 4). Estos dos movimientos ondulantes, que se trasladan simultáneamente en la misma trayectoria, no permanecerán como entidades aisladas, antes bien, como indica la figura incluida en el rectángulo, se combinan (es decir, interfieren) para producir un movimiento ondulatorio compuesto (sombreado gris), cuya amplitud es $R$. Así, los vectores de vibración de las dos ondas originales cuando coinciden en el espacio y en el tiempo, se combinan vectorialmente para producir los vectores de vibración de la onda compuesta. Por ejemplo, la suma de los vectores 1′ más 1″ es cero, mientras que 2′ y 2″ dan el vector 2. La forma de tales movimientos ondulados compuestos depende de las longitudes de onda, de las amplitudes y de las diferencias en la trayectoria de las ondas originarias que interfieren. En el caso más común en mineralogía óptica, en el cual existe una diferencia de $x\lambda$ en las trayectorias de las dos ondas de semejante longitud, la relación entre sus amplitudes ($r_1$ y $r_2$) y la amplitud de la onda resultante ($R$) es:

$$R^2 = r_1^2 + r_2^2 + 2r_1r_2 \cos (x \cdot 360^\circ) \qquad \text{(Ec. 7-1)}$$

Nótese que si las dos ondas que interfieren están en fase —es decir, la diferencia de su trayectoria es 0, $1\lambda$, $2\lambda$, ..., o $n\lambda$— la ecuación 7-1 indica que $R$ es igual a la suma de $r_1 + r_2$. En este caso se da una *interferencia constructiva,* pues la onda resultante tiene una amplitud mayor que las que la originaron. Si las dos ondas que interfieren están exactamente fuera de fase, esto es, su diferencia de trayectoria es

$$\frac{1}{2}\lambda,\ \frac{3}{2}\lambda,\ \ldots,\ \text{ó}\ \frac{2n+1}{2}\lambda$$

la ecuación 7-1 indica que $R$ es igual a la diferencia entre $r_1$ y $r_2$. En este caso se da una *interferencia destructiva,* pues la onda que resulta tiene una amplitud menor que las ondas que la formaron. En una situación tal, en que $r_1$ fuese igual a $r_2$, se daría una *interferencia destructiva total,* los dos movimientos ondulantes se anularían el uno al otro para producir una inmovilidad en lugar de un movimiento ondulante.

## ONDAS POLARIZADAS EN PLANOS PERPENDICULARES

Para dos ondas que se propagan simultáneamente a lo largo de la misma trayectoria, pero que vibran en dos planos mutuamente perpendiculares (figura 7-2), la onda resultante representará de nuevo el vector suma de las vibraciones de las dos ondas originarias para todos los puntos a lo largo de la trayectoria. En el caso que se describe, mientras los puntos de desplazamiento

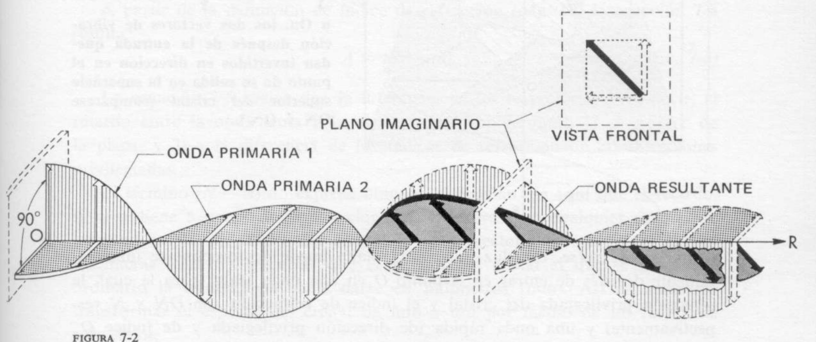



FIGURA 7-2

**Interferencia entre dos ondas, polarizadas en planos perpendiculares entre sí, para producir un movimiento ondulatorio resultante (polarizado en otro plano). El plano imaginario indica, como en cualquier punto a lo largo de OR, los vectores de vibración de los dos movimientos originarios (flechas de contorno) que pueden sumarse vectorialmente para producir los vectores de vibración (flechas negras) de la onda resultante.**

cero coinciden para ambas ondas, la onda resultante (gris oscura en la figura 7-2) vibrará en un plano que forma un cierto ángulo con el plano de vibración de cada onda originaria. La suma vectorial en un punto determinado de ambas ondas (flechas de trazos) para dar la vibración resultante (flechas negras enteras) está representada en el plano imaginario de la figura 7-2.

## Cálculo de la diferencia de trayectoria o retardo

Dos movimientos ondulatorios perpendiculares y polarizados planos, como los representados en la figura 7-2, pueden considerarse como procedentes de un cristal anisótropo a través del cual incida la luz polarizada plana (fig. 7-3).

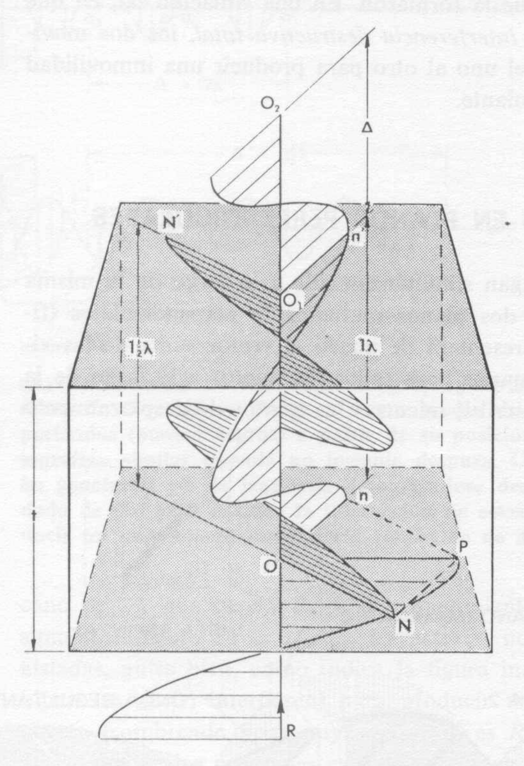



FIGURA 7-3

**Paso de la luz a través de una placa de un cristal que produce un retardo (Δ) de 270 mμ. Si se ilumina con una luz de 540 mμ de longitud de onda, esa distancia representa $\frac{1}{2}\lambda$. Nótese que si la diferencia de trayectoria es de $\frac{1}{2}\lambda$ —o de $\frac{2n+1}{2}\lambda$— bien ON u On, los dos vectores de vibración después de la entrada quedan invertidos en dirección en el punto de su salida en la superficie superior del cristal (compárese ON y ON').**

Como puede verse, esta luz polarizada plana puede descomponerse inmediatamente después de entrar en el punto *O* en una onda lenta (para la cual, la dirección privilegiada del cristal y el índice de refracción son *ON* y *N* respectivamente) y una onda rápida (de dirección privilegiada y de índice $O_n$ y *n*) [1]. En este mismo instante, las dos ondas están precisamente en fase, no existen diferencias de trayectorias entre ellas. Sin embargo, al pasar a tra-

[1] Los símbolos *n* y *N* (que se leen respectivamente «ene minúscula y ene mayúscula») se usan aquí para referirse a los índices de refracción mínimo y máximo de cualquier placa birrefringente. Para los estudiantes que comienzan les es más práctico nemotécnicamente que usar $n_1$ y $n_2$ para estos índices.

vés de un cristal del espesor $t$, la onda lenta requiere un tiempo $T_N$, mientras que la onda rápida requiere sólo $T_n$, una cantidad menor. Por consiguiente, mientras «espera» que la onda lenta emerja, la onda rápida se propaga la distancia $c\ (T_N - T_n)$ en el aire, siendo $c$ la velocidad de la luz. La figura 7-3 es en esencia una «fotografía» tomada en el preciso momento en que la onda lenta está a punto de emerger en el aire y muestra cómo la onda rápida ha recorrido esa distancia. Esta distancia es la diferencia de fase ($\Delta$) entre estos dos trenes de onda polarizados perpendicularmente, cuando se desplazan en el aire a lo largo de la dirección $O_1O_2$; así

$$\begin{aligned}\Delta &= c(T_N - T_n)\\ &= cT_N - cT_n \qquad \text{(Ec. 7-2)}\end{aligned}$$

Las velocidades reales de las ondas lenta y rápida, cuando se propagan en el cristal (simbolizadas aquí como $c_N$ y $c_n$ respectivamente) son, según la fórmula que relaciona el espacio con el tiempo

$$c_N = \frac{t}{T_N}; \qquad c_n = \frac{t}{T_n} \qquad \text{(Ec. 7-3)}$$

Despejando $T_N$ y $T_n$, y sustituyendo los valores así obtenidos en la ecuación 7-2, el resultado es:

$$\begin{aligned}\Delta &= \frac{ct}{c_N} - \frac{ct}{c_n}\\ &= t\left(\frac{c}{c_N} - \frac{c}{c_n}\right) \qquad \text{(Ec. 7-4)}\end{aligned}$$

A partir de la definición de índice de refracción (pág. 18) la ecuación 7-4 resulta:

$$\Delta = t(N - n) \qquad \text{(Ec. 7-5)}$$

La ecuación 7-5 indica que la diferencia de las trayectorias —es decir, el retardo entre la onda lenta y la rápida— es proporcional: 1) al espesor de la placa, y 2) a la diferencia de los índices de refracción de las direcciones privilegiadas.

El término $(N - n)$ no expresa ninguna dimensión, de aquí que el retardo, si se obtiene a partir de la ecuación 7-5, se expresa en cualquier unidad de longitud empleada para $t$. La diferencia de trayectoria se suele expresar en milimicras (m$\mu$) (2), mientras que el espesor del cristal al que se refiere de ordinario la mineralogía suele darse en milímetros (mm). Así es necesario transformar el espesor del cristal de mm a m$\mu$ por medio de un factor de conversión

$$1 \text{ mm} = 10^6 \text{ m}\mu$$

(2) Anteriormente a este capítulo las longitudes de onda se habían expresado en unidades Angström siguiendo a los físicos. En este capítulo, sin embargo, las longitudes de onda se expresarán en m$\mu$, la unidad de longitud más comúnmente usada para retardos. Puesto que 1 m$\mu$ equivale a 10 Å, la longitud de onda de la luz de sodio se puede expresar como de 589,3 m$\mu$.

Por ejemplo, imagínese una placa de un cristal que posea un espesor de 0,03 mm, con unos índices de refracción de 1,553 y 1,544 para sus dos direcciones privilegiadas. Para esta placa

$$\Delta = (1{,}553 - 1{,}544)\,0{,}03 \text{ mm}$$
$$= 0{,}009 \times 0{,}030 \times 10^6 \text{ m}\mu$$
$$= 270 \text{ m}\mu$$

Partiendo de la discusión de la página 112, el lector queda invitado a inferir que, después de su salida del cristal en la figura 7-3, los trenes de ondas lento y rápido se han desplazado simultáneamente a lo largo de $O_1O_2$ como dos movimientos ondulantes discretos. En realidad, sin embargo, como se trató en la página 111, estas dos ondas se interfieren mutuamente para producir un movimiento ondulatorio resultante. Este movimiento ondulante resultante será pleno, circular o elípticamente polarizado según sean los retardos entre los dos trenes de ondas que interfieran. La naturaleza de estos tipos de polarización, y su relación con la diferencia de trayectoria de las dos ondas que interfieren, se tratará más adelante.

## Polarización plana de la onda resultante

Imagínese que la onda lenta requiere dos períodos y la onda rápida sólo uno para atravesar el cristal de la figura 7-4A (3). Después de salir, por tanto, existe una diferencia de trayectoria de $\lambda$ entre los dos trenes de ondas. Por consiguiente, como es siempre el caso para diferencias de trayectoria de $0\lambda$, $1\lambda$, $2\lambda$, ..., $n\lambda$, las dos ondas emergentes en $O_1$ están en fase; es decir, en cualquier punto a lo largo de $O_1O_2$, las vibraciones de estas dos ondas están, o ambas en la misma dirección como *On* y *ON*, o ambas opuestas, representando *On* y *ON* las vibraciones de las dos ondas inmediatamente después de penetrar en el cristal por *O* (cuando estaba exactamente en fase).

Dentro del cristal, los dos trenes de ondas son incoherentes —es decir, incapaces de interferirse mutuamente; después de su salida, sin embargo, se hacen coherentes—. Así, en lugar de comportarse como los movimientos ondulantes discretos que se han indicado con curvas de trazos en la figura 7-4A, sus vectores de vibración son vectorialmente aditivos en todos los puntos de coincidencia, en espacio y en tiempo; los puntos $O_1$, *a* y *b*, son ejemplos detallados. Como queda demostrado, su onda resultante está polarizada plana y vibra precisamente en el mismo plano en que lo hace la luz que incide en el cristal (como es siempre el caso cuando la diferencia de trayectoria es 0, $1\lambda$, $2\lambda$, ..., $n\lambda$). Nótese que si se inserta el analizador, con su dirección privilegiada perpendicular a la del polarizador (es decir, con los nicoles cruza-

(3) Un período es el tiempo requerido para que las vibraciones completen una longitud de onda. Como puede verse en la figura 7-4A la onda lenta produce dos longitudes de onda al pasar por el cristal, mientras que la rápida sólo produce una. El período de un movimiento ondulatorio se refiere técnicamente como el inverso de la frecuencia y es constante para un color dado completamente puro.

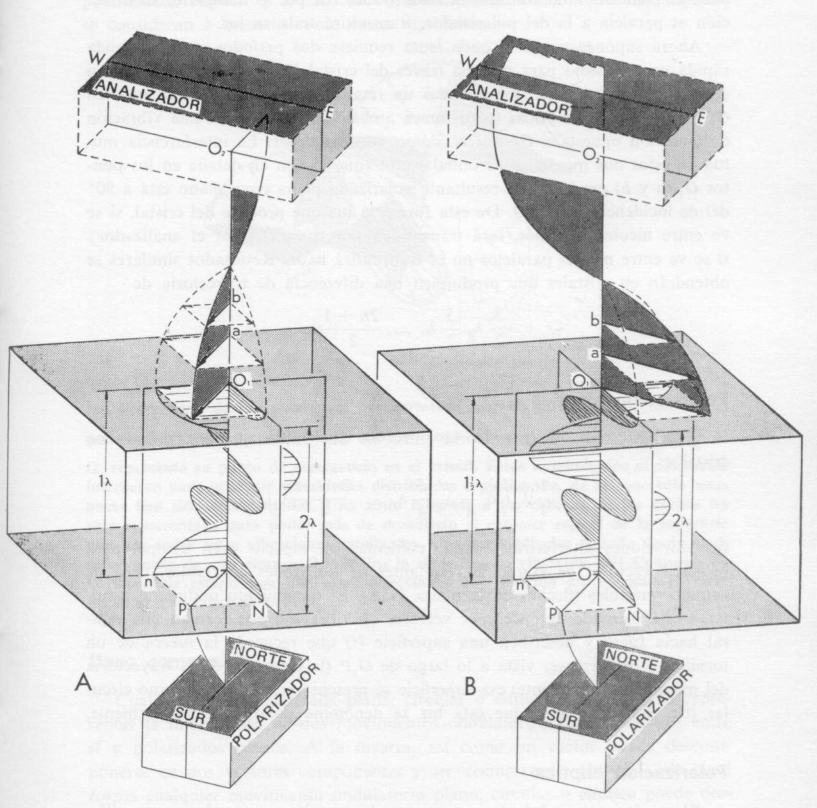



FIGURA 7-4

**Interferencia mutua, después de su salida de un cristal anisótropo situado a 45° de la posición de extinción, de lo que anteriormente las onda lenta y rápida en el interior del cristal. En (A) el paso a través del cristal ha producido una diferencia de trayectoria de 1 λ entre ambas ondas, y el movimiento ondulatorio resultante después de su salida en $O_1$ está polarizado en el mismo plano que la luz que procede del polarizador. En (B), donde la diferencia de trayectoria es $\frac{1}{2}$ λ, el movimiento ondulatorio resultante después de emerger en $O_1$ está a 90° del plano de polarización de la luz que procede del polarizador. Entre nicoles cruzados, por tanto, la luz resultante que emerge del cristal queda en (A) completamente extinguida por el analizador pero en (B) se transmite por completo (las pérdidas por reflexión y por absorción se han despreciado).**

dos), el analizador no transmitirá nada de luz. Si por el contrario, su dirección es paralela a la del polarizador, transmitirá toda su luz.

Ahora supóngase que la onda lenta requiere dos períodos y que la onda rápida uno y medio para pasar a través del cristal (fig. 7-4B). Después de su emergencia existe entre ambas ondas un retardo de $\frac{1}{2}\lambda$. Por consiguiente, en $O_1$ una de estas dos ondas (pero nunca ambas) tendrá siempre una vibración de dirección opuesta a *On* u *ON*, como puede suceder. La interferencia mutua de estos dos movimientos ondulatorios (que se ven en detalle en los puntos $O_1$, *a* y *b*) produce una resultante polarizada plana cuyo plano está a 90° del de incidencia de la luz. De esta forma la luz que procede del cristal, si se ve entre nicoles cruzados, será transmitida por completo por el analizador; si se ve entre nicoles paralelos no se transmitirá nada. Resultados similares se obtendrán en cristales que produjesen una diferencia de trayectoria de

$$\frac{3}{2}\lambda, \frac{5}{2}\lambda, \ldots, \frac{2n+1}{2}\lambda.$$

## Polarización circular

Si la diferencia de trayectoria entre las dos ondas que emergen de un cristal es

$$\frac{1}{4}\lambda \left( \text{ó } \frac{3}{4}\lambda, \frac{5}{4}\lambda, \ldots, \frac{2n+1}{4}\lambda \right)$$

sus vibraciones interferirán cuando coincidan en espacio y en tiempo, para producir vectores de vibración resultantes de longitudes constantes, pero de acimuts variables (flechas en la figura 7-5A). El movimiento ondulante resultante está formado entonces por vectores de vibración que forman una espiral hacia fuera y describen una superficie ([4]) que recuerda la tuerca de un tornillo. Si pudiera ser vista a lo largo de $O_1P$ (la dirección de la trayectoria del movimiento ondulante) esa superficie se presentaría con un contorno circular (fig. 7-5B), de aquí que esta luz se denomine polarizada circularmente.

## Polarización elíptica

El movimiento ondulante que emerge de cristales que producen una diferencia de trayectoria diferente de

$$0, \frac{1}{4}\lambda, \frac{1}{2}\lambda, \frac{3}{4}\lambda, 1\lambda, \ldots, \frac{n+1}{4}\lambda$$

forma una espiral como sucede en el caso de la polarización circular. Ahora bien, los vectores de vibración no mantienen una longitud constante. De esta forma, si se observa la figura 7-5B, se ve que la superficie espiral que se forma con todos los vectores de vibración es elíptica en lugar de ser de contorno circular; por ello se dice que esta luz está polarizada elípticamente. La

([4]) Conocida en matemáticas como superficie de Riemann.

polarización elíptica es el caso más frecuente y general; la circular y plana se consideran a menudo como casos especiales.

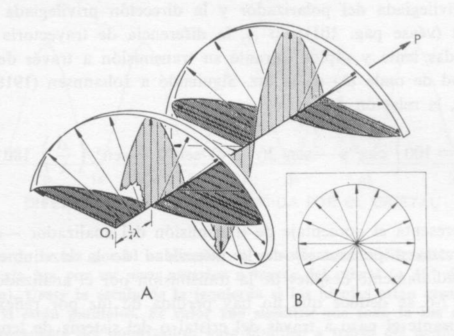



FIGURA 7-5

**(A) Producción de luz polarizada circularmente, por la interacción de dos ondas polarizadas planas perpendiculares entre sí, cuya diferencia de trayectoria es $\frac{1}{4}\lambda$; $O_1$ representa su punto de emergencia en el cristal. Estos movimientos ondulatorios interfieren para producir vibraciones distribuidas espiralmente, de las que sólo unas pocas han sido representadas. Una cinta tangente a las cabezas de las flechas ha sido representada para poner más de manifiesto el carácter espiral de la superficie que une todas estas vibraciones resultantes. Una perpendicular trazada desde cualquier punto de esta cinta a $O_1P$ indica la dirección de vibración. (B) Contorno de la superficie espiral que une estas direcciones de vibración tal y como se vería mirando a lo largo de $O_1P$.**

## Usos comunes

Cualquier onda polarizada plana, circular o elipsoidalmente puede representar la intersección de dos movimientos ondulatorios perpendiculares entre sí y polarizados planos. A la inversa, así como un vector puede descomponerse en dos vectores componentes y ser reemplazado por ellos, de igual forma cualquier movimiento ondulatorio plano, circular o elíptico puede descomponerse en dos ondas polarizadas planas, mutuamente perpendiculares entre sí y ser reemplazado por ellas. En mineralogía óptica, es a veces conveniente suponer que las ondas lenta y rápida no interfieren después de salir del cristal, para evitar la necesidad de representar una polarización elíptica, a la vez que para simplificar la explicación.

# TRANSMISIÓN POR EL ANALIZADOR

Después de su paso sucesivo a través del polarizador, del cristal y del analizador, el porcentaje de luz monocromática que se ha transmitido por

el analizador depende de: a) $\phi$, el ángulo entre las direcciones privilegiadas del polarizador y del analizador (véase pág. 85); b) $\tau$, el ángulo entre la dirección privilegiada del polarizador y la dirección privilegiada del cristal más cercana (véase pág. 101); c) $\Delta$, la diferencia de trayectoria producida entre las ondas lenta y rápida durante su transmisión a través del cristal, y d) la longitud de onda ($\lambda$) de la luz. Siguiendo a Johannsen (1918, pág. 343 y siguientes), la relación general es

$$L = 100 \left[ \cos^2 \phi - \text{sen } 2(\tau - \phi) \cdot \text{sen } 2 \ \tau \cdot \text{sen}^2 \left( \frac{\Delta}{\lambda} \right) 180° \right] \quad \text{(Ec. 7-6)}$$

donde $L$ representa el porcentaje de transmisión del analizador —es decir, la relación (llevada a porcentaje) de la intensidad de la luz inmediatamente antes, e inmediatamente después de la transmisión por el analizador—. Dada la ecuación 7-6 se deduce que no hay pérdida de luz por reflexión o por absorción durante el paso a través del cristal o del sistema de lentes del microscopio.

En el importante caso en el que el cristal se observe a 45° de la posición de extinción entre nicoles cruzados (es decir cuando $\tau$ es igual a 45° y $\phi$ igual a 90°) la ecuación 7-6 queda reducida a

$$L = 100 \ \text{sen}^2 \frac{\Delta}{\lambda} = 180° \quad \text{(Ec. 7-7)}$$

Si el cristal se ve en igual posición entre nicoles paralelos (es decir cuando $\tau$ es igual a 45° y $\phi$ igual a 0 grados), la ecuación 7-6 se convierte en:

$$L = 100 \cos^2 \frac{\Delta}{\lambda} 180° \quad \text{(Ec. 7-8)}$$

La figura 7-6 basada en las ecuaciones 7-7 y 7-8, ilustra gráficamente cómo $L$, el porcentaje de transmisión del analizador, varía para un cristal situado a 45° de la posición de extinción de acuerdo con su retardo (o diferencia de fase). La escala de la izquierda cita porcentajes si los nicoles están cruzados y la escala de la derecha es para nicoles paralelos.

## COLORES DE INTERFERENCIA

### Origen

Si se iluminan con luz blanca placas de cristales anisótropos vistos (no en extinción) entre nicoles cruzados o paralelos, aparecerán coloreadas. Estos colores, conocidos como colores de interferencia, son el resultado de una desigual transmisión del analizador, de los distintos componentes de la luz blanca. Las longitudes de onda particulares que transmite (o absorbe) el analizador dependen del retardo producido en la luz en su anterior paso a

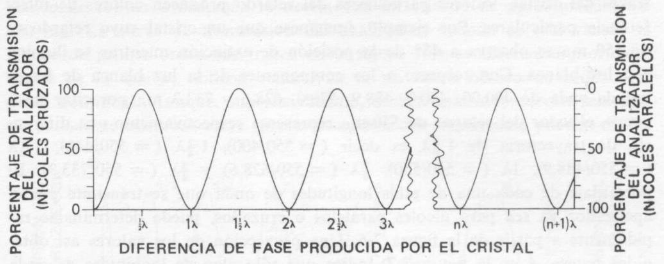



FIGURA 7-6

**Transmisión de la luz por el analizador de acuerdo con la diferencia de fase producida en esta luz por un paso anterior a través del cristal (a 45° de la posición de extinción). Úsese la escala de la izquierda si los nicoles están cruzados, y la de la derecha si están paralelos. El valor 100 significa que toda la luz que incide en el cristal procedente del polarizador, pasa también a través del analizador (se han despreciado todas las pérdidas debidas a reflexión o a absorción).**

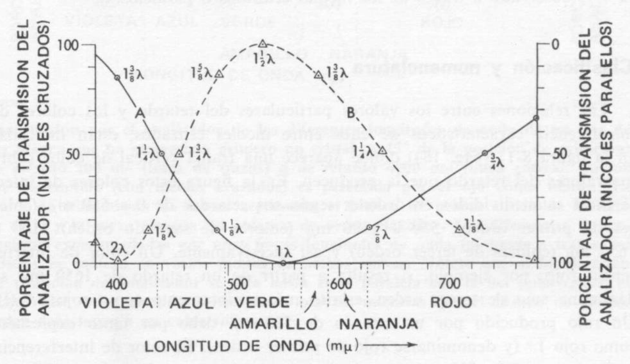



FIGURA 7-7

**Porcentaje de transmisión por el analizador de las diferentes longitudes de onda en un haz de luz blanca que haya atravesado primero un cristal de retardo 550 m$\mu$ (curva A), o de retardo 800 m$\mu$ (curva B), ambos cristales están a 45° de la posición de extinción. Si el cristal está entre nicoles cruzados, léase en la escala de la derecha; para nicoles paralelos, léase la escala de la izquierda. En el caso A, el cristal aparece de color violeta rojizo entre nicoles cruzados, pero verde entre nicoles paralelos. En el caso B sucede lo contrario. Las diferencias de trayectoria que existen para unas pocas longitudes de onda (por su paso a través de cada uno de los cristales) se muestran en varios puntos de ambas curvas. Por ejemplo, luz de longitud de onda 400 m$\mu$ contenida en la luz blanca incidente, experimenta una diferencia de trayectoria de 2 $\lambda$ durante su paso a través del cristal asociado con la curva B, pero la diferencia es de $1\frac{3}{8}\lambda$ durante el paso a través del cristal asociado con la curva A.**

través del cristal. Valores particulares del retardo producen colores de interferencia particulares. Por ejemplo, imagínese que un cristal cuyo retardo es de 550 m$\mu$ se observa a 45° de la posición de extinción mientras se ilumina con luz blanca. Con respecto a los componentes de la luz blanca de longitud de onda de 400,00, 440,0, 488,9, 580,0, 628,6 y 733,3 m$\mu$ por citar unos pocos, el valor del retardo de 550-m$\mu$ representa respectivamente una diferencia de trayectoria de 1 $\frac{3}{8}\lambda$ es decir ( = 550/400), 1 $\frac{1}{4}\lambda$ ( = 550/440), 1 $\frac{1}{8}\lambda$ ( = 550/488,9), 1$\lambda$ ( = 550/550), $\frac{7}{8}\lambda$ ( = 550/628,6) y $\frac{3}{4}\lambda$ ( = 550/733,3). El porcentaje de cada una de estas longitudes de onda que se transmite por el analizador ya sea para nicoles paralelos o cruzados, puede determinarse rápidamente a partir de la figura 7-6. Una proyección de los valores así obtenidos (curva *A* en la figura 7-7) indica que sólo algo de longitudes de onda amarilla y verde es transmitida por el analizador, si el cristal se ve entre nicoles cruzados, y por consiguiente aparece rojizo o violeta; visto entre nicoles paralelos, el mismo cristal (referida ahora la curva *A* a la escala de la derecha en la figura 7-7) transmitirá más luz verde y aparecerá entonces verde. La curva de transmisión para el analizador puede determinarse de la misma forma para un cristal cuyo retardo sea de 800 m$\mu$ (curva *B* en la figura 7-7) observado a través de los nicoles cruzados o paralelos.

## Clasificación y nomenclatura

Las relaciones entre los valores particulares del retardo y los colores de interferencia característicos de ellos entre nicoles cruzados, están indicadas en la figura 8-17 (pág. 164) donde aparece una franja vertical de color sobre los valores del retardo que la producen. En la figura estos colores de interferencia están divididos en órdenes según sus retardos de 0 a 550 m$\mu$ (colores de primer orden), 550 a 1100 m$\mu$ (colores de segundo orden) 1100 a 1650 m$\mu$ (colores de tercer orden) y así sucesivamente. Un color de interferencia rojo, por ejemplo, si resulta a partir de un retardo de 1650 m$\mu$ se denomina rojo de tercer orden, escrito más sucintamente como rojo 3.º ([5]). Un rojo producido por un retardo de 550 m$\mu$ debe por tanto expresarse como rojo 1.º (y denominarse rojo de primer orden). El color de interferencia que corresponde a 560 m$\mu$, con el que comienza el segundo orden, puede ser fácilmente distinguido por el ojo humano entre los colores de interferencia que se le asocian de retardos ligeramente mayores o menores de 560 m$\mu$. Por consiguiente este color se denomina *tinta sensible, violeta sensible* o «tinta de paso». Los colores de interferencia gris y rosa alternantes, asociados a retardos crecientes de más de 2300 m$\mu$, se hacen cada vez más lechosos, hasta convertirse en blanco invariable para retardos muy altos sea cual sea su valor. Este blanco se denomina *blanco de alto orden* para distinguirlo del

([5]) Los símbolos 1.º, 2.º, 3.º, 4.º,..., representan los términos «primer orden», «segundo orden», «tercer orden», «cuarto orden»... Este convencionalismo es particularmente práctico en ilustraciones en las que el espacio es limitado. No es posible que se produzca confusión con el simbolismo que indica los grados de temperatura, o los ángulos.

blanco de primer orden, que se asocia con un retardo de aproximadamente 200 m$\mu$. La curva de transmisión del analizador, cuando se está viendo el blanco de primer orden (de trazos en la figura 7-8), se diferencia profundamente de la que se obtiene cuando se ve un típico blanco de orden alto (línea continua). Aunque, superficialmente, ambos colores parezcan semejantes cuando se observen entre nicoles cruzados, con experiencia pueden distin-

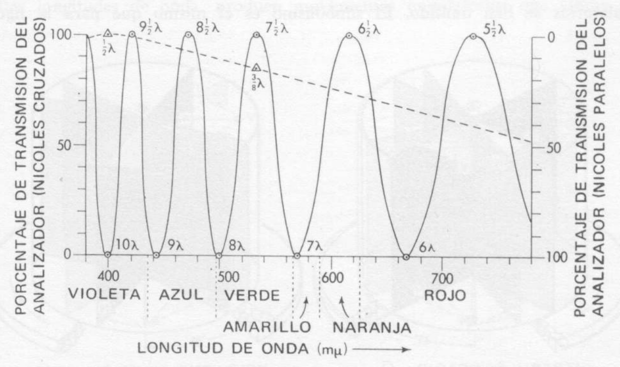



FIGURA 7-8

**Transmisión por el analizador de las diferentes longitudes de onda de un haz de luz blanca que ha atravesado primero un cristal (a 45° de la posición de extinción) de retardo 200 m$\mu$ (línea de trazos) o de retardo 4000 m$\mu$ (línea entera). La luz así transmitida (con nicoles cruzados) es percibida por el ojo como blanca. La curva de transmisión de trazos representa el blanco de primer orden de la figura 8-17, y la curva sinuosa un «blanco de orden elevado». Las diferencias de trayectoria experimentadas por unas pocas longitudes de onda (al pasar a través del cristal), se indican en varios puntos de ambas curvas. Nótese que si la dirección de vibración del analizador se gira hasta estar paralela con la del polarizador, el blanco del orden elevado permanecerá blanco, mientras que el blanco de primer orden dará lugar a un color rojizo.**

guirse de un vistazo puesto que el blanco de orden alto aparece más cremoso, mientras que el de primer orden es más azulado. Se distinguen mejor insertando un accesorio (véase pág. 144 y sig.) puesto que éste produce un pronunciado cambio de color en el blanco de primer orden pero no en el blanco de orden elevado.

## Efecto de la rotación

El color de interferencia de una placa anisótropa, observado durante la rotación de la platina, cambia en intensidad pero no en tono. Para comprender esto, considérense, primero, las longitudes de onda que atraviesan el cris-

tal cuyas ondas lentas producen retardos equivalentes a diferencias de fase de 1λ, 2λ, 3λ, ..., o *n*λ. Después de emerger de un cristal que esté situado a 45° de la posición de extinción, estas longitudes de onda producen movimientos ondulatorios resultantes que están polarizados planos y paralelos a la luz incidente (la figura 7-4A explica esto con detalle). En la figura 7-9 se muestra esto, aunque menos detalladamente, para un cilindro cortado del cristal de la figura 7-4A; los contornos sinusoidales de los movimientos ondulatorios se han omitido. El simbolismo es el mismo que para la figu-

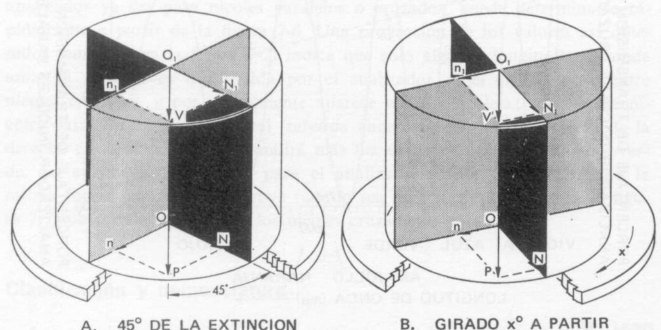



FIGURA 7-9 A-B

**Efecto de la rotación en un color de interferencia. (A) Cristal a 45° de la posición de extinción; la luz experimenta durante su paso a través del cilindro del cristal una diferencia de trayectoria de 1 λ, 2 λ, ..., n λ. El movimiento ondulante que resulta emerge del cristal vibrando paralelo a $O_1V_1$ cuya dirección coincide con OP, la dirección privilegiada del polarizador. (B) Cristal girado un ángulo x, en sentido de las agujas del reloj, a partir de la posición (A); el plano de vibración del movimiento ondulante resultante después de esta rotación —es decir, $O_1V'$— tiene la misma dirección que $O_1V$ en (A).**

ra 7-4A: *OP* representa la dirección y la amplitud de la luz procedente del polarizador; *On* y *ON*, las direcciones de vibración y amplitud de las dos ondas luminosas en las que se divide la luz incidente inmediatamente después de penetrar en el cristal. Para indicar en la figura 7-9A que existe una diferencia de trayectoria de 1λ, 2λ, 3λ, ..., o *n*λ, entre las dos ondas que emergen en $O_1$, $O_1n_1$ y $O_1N_1$ se representan dirigidas en la misma dirección que *On* y *ON*. La figura 7-4A muestra el porqué de este convencionalismo. El resultado de $O_1n_1$ y $O_1N_1$ es $O_1V$. Así, la resultante de la luz que emerge a partir del cristal vibra paralela a la luz incidente. La rotación de la platina, según un ángulo de *x* grados en sentido de las agujas del reloj (figura 7-9B), cambia las direcciones y longitudes de $On_1$ y $ON_1$, pero no su resultado $O_1V'$. Así, fuera cual fuese la posición de la platina, la luz resultante quedará extinguida por el analizador (suponiendo los nicoles cruzados).

Considérense ahora las longitudes de onda de la luz blanca, cuyas ondas lentas experimentan retardos equivalentes a diferencia de trayectoria de

$$\frac{1}{2}\lambda,\ \frac{3}{2}\lambda,\ \ldots,\ \text{o}\ \frac{2n+1}{2}\lambda$$

Después de la emergencia del cristal a 45 grados de la posición de extinción, estas longitudes de onda producn movimientos ondulatorios que vibran a

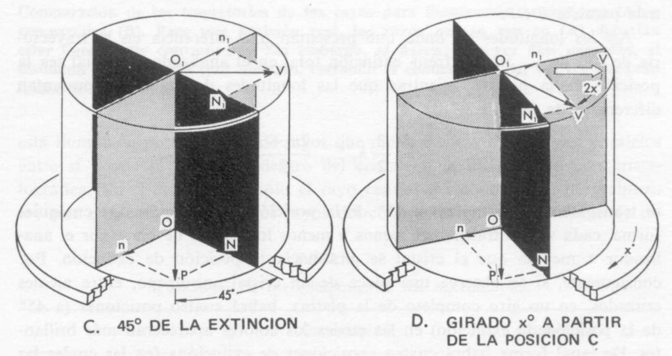



FIGURA 7-9 C-D

**(C) Cristal a 45° de la posición de extinción; la luz experimenta una diferencia de trayectoria de $\frac{1}{2}\lambda, \frac{3}{2}\lambda, \ldots,$ o $\frac{2n+1}{2}\lambda$ durante su paso a través del cilindro de cristal. El movimiento ondulante que resulta al emerger del cristal, vibra paralelo a $O_1V$ que está ahora a 90° de OP, la dirección privilegiada del polarizador. (D) Cristal girado x grados, en sentido de las agujas del reloj, a partir de la posición (C). El plano de vibración del movimiento ondulatorio resultante después de esta rotación —es decir, $O_1V'$— vibra ahora a (90° — 2 x°) de OP, dirección privilegiada del polarizador.**

90° perpendicularmente a la dirección de incidencia de la luz (véase fig. 7-4B). La figura 7-9C, un cilindro cortado del cristal de la figura 7-4B, muestra esto de manera más sencilla. Para indicar una diferencia de trayectoria de

$$\frac{1}{2}\lambda,\ \frac{3}{2}\lambda,\ \ldots,\ \text{o}\ \frac{2n+1}{2}\lambda,$$

$On_1$ está dibujado con su dirección opuesta a $On$. El estudio de la figura 7-4B pone de manifiesto la lógica de esto. A causa de su reversión, la resultante de $O_1n_1$ y $O_1N_1$ (es decir, $O_1V$) forma un ángulo de 90° con $OP$. De esta forma, para el cristal colocado a 45° de la posición de extinción, la luz que emerge de él vibra a 90° de como lo hacía antes de entrar en el mismo.

Esta luz resultante estaría, por tanto, transmitida completamente por el analizador (se supone que los nicoles están cruzados). Al girar el cristal un ángulo $x$ en la dirección de las agujas del reloj, a partir de la posición que tiene en la figura 7-9C —es decir, $x$ grados a partir de su posición a 45° de la de extinción— el vector resultante $O_1V'$ (véase fig. 7-9D) gira un ángulo de $2x$ grados a partir de su dirección anterior ($O_1V$). Puesto que $O_1V'$ ya no es paralelo a la dirección privilegiada del analizador (para nicoles cruzados), la luz resultante no es transmitida completamente por el analizador. Al girar el cristal hasta una posición de extinción, la resultante $O_1V'$ se hace cada vez más paralela a $OP$.

Así las longitudes de onda que presentan una diferencia en la trayectoria de $1\lambda$, $2\lambda$, ..., $n\lambda$, «sufren» extinción total en el analizador sea cual sea la posición de la platina, mientras que las longitudes de onda que presentan diferencias de fase de

$$\frac{1}{2}\lambda,\ \frac{3}{2}\lambda,\ \ldots,\ \frac{2n+1}{2}\lambda$$

se transmiten por completo a 45° de la posición de extinción. De cualquier forma, cada vez se transmiten menos y menos longitudes de onda por el analizador a medida que el cristal se gira hacia la posición de extinción. Por consiguiente, si se observa una placa de un cristal anisótropo, entre nicoles cruzados, en un giro completo de la platina, habrá cuatro posiciones (a 45° de la posición de extinción) en las cuales los colores aparecerán más brillantes. De igual forma habrá cuatro «posiciones de extinción» (en las cuales las direcciones privilegiadas de la placa estén paralelas con las del analizador y del polarizador) en las que los colores de interferencia sean de intensidad cero. La existencia de colores de interferencia y las posiciones de extinción asociadas, cuando se gira un grano, es un criterio de anisotropía de los cristales.

## OBSERVACIÓN ORTOSCÓPICA Y CONOSCÓPICA DE LOS FENÓMENOS DE INTERFERENCIA

En mineralogía óptica los fenómenos de interferencia producidos por la acción de cristales anisótropos en la luz, pueden observarse cuando el microscopio actúa: 1) como un ortoscopio o 2) como un conoscopio. La posición ortoscópica puede considerarse como una disposición normal del microscopio en la cual está insertado el polarizador (bajo la platina) y el analizador (sobre la platina), siendo sus direcciones privilegiadas perpendiculares entre sí. La disposición conoscópica requiere, además de esto, la inserción de una lente de Bertrand y de una lente condensadora bajo la platina. La última, hace que el objeto que está en la platina quede iluminado por un cono de luz (fig. 7-10B) en lugar de por un haz de rayos casi paralelos, como ocurre en el ortoscopio (fig. 7-10A). Con el ortoscopio, por tanto, el cristal

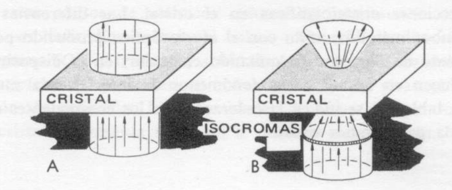



FIGURA 7-10

**Comparación de las trayectorias de los rayos para iluminación ortoscópica (A) y conoscópica (B). Para una posición real, los rayos que se ven en (A) deberían estar ligeramente convergentes. Sin embargo, se hacen cada vez más paralelos, al disminuir las aperturas (por ejemplo, cerrando el condensador del iris o colocando lentes de poco aumento).**

está iluminado por una serie de rayos que inciden normalmente, casi paralelos entre sí y que se propagan dentro del cristal en la misma dirección cristalográfica. En el conoscopio, sólo el rayo central del cono incide normalmente; por esta causa los distintos rayos del cono se propagan a lo largo de di-

TABLA 7-1

Posiciones de los componentes del microscopio

| | | Ortoscopio | Conoscopio |
|---|---|---|---|
| Lente de Bertrand | | Sin insertar | Insertada (1). Si está equipada con un diafragma de iris, su apertura debe reducirse al mínimo (especialmente para cristales pequeños) |
| Analizador | | Insertado (Dirección privilegiada normal a la del polarizador) | |
| Objetivos | | Bajo, medio o alto según el aumento deseado | Sólo objetivo de alto poder (A. N. 0,85 preferible) |
| Conjunto de debajo de la platina | Lentes condensadoras | Lentes no insertadas | Insertar las lentes (o, en caso contrario, usar un aparato que produzca un cono de luz que ilumine la platina más convergentemente) |
| | Diafragma de iris | Reducido a lo que se necesite para el detalle | Abierto; cerrar después para ver con detalle |
| | Polarizador | Insertado | |

(1) *N. B.* Si el microscopio no tiene lente de Bertrand, la disposición conóscopica puede obtenerse sustituyendo el ocular por un diopter.

ferentes direcciones cristalográficas en el cristal. Las diferencias de iluminación en ambos métodos, junto con el efecto óptico producido por la inserción de la lente de Bertrand (o quitando el ocular) en la disposición conoscópica, producen en ambos casos fenómenos de interferencia muy diferentes ([6]). En la tabla 7-1 se indica la coloración de los componentes del microscopio sugerida para ambos casos.

## EXAMEN ORTOSCÓPICO DE LOS CRISTALES

En anteriores discusiones se asumió tácitamente, que el microscopio estaba siendo usado como un ortoscopio. En resumen, un cristal bajo examen ortoscópico, si se le ilumina con luz blanca, podrá poseer un color de inter-

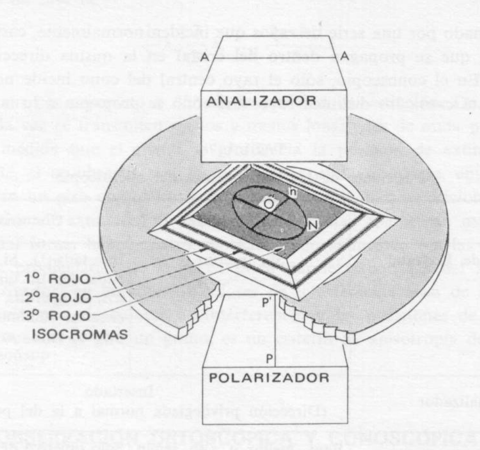



FIGURA 7-11

**Cristal colocado a 45° de la posición de extinción en una platina giratoria. Sus direcciones privilegiadas ON y On se hacen paralelas a AA′ o PP′ durante cuatro veces en un giro completo de la platina. En dichas ocasiones el cristal está extingido.**

ferencia cuyo tono dependerá de su retardo, es decir del producto de *t*, su espesor, y (*N-n*) la diferencia entre los índices de refracción para sus direcciones privilegiadas. A lo largo de los bordes del grano (fig. 7-11) el retardo será menor y los colores de interferencia serán más bajos que los que se produzcan en el centro, más grueso. Todos los puntos del grano de igual espesor estarán representados por el mismo color de interferencia, las líneas

([6]) Los diferentes caminos seguidos por los rayos, tanto en la disposición conoscópica como en la ortoscópica, han sido tratados detalladamente por Rinne y Berek (1953, págs. 38-40).

que unen estos puntos de idénticos colores de interferencia se denominan isocromas —es decir, líneas de igual color—. Cuando las direcciones privilegiadas del grano (*ON* y *On*) estén a 45° de las de los polarizadores, estos colores de interferencia presentan su máximo brillo. Al girar el cristal hacia una posición de extinción, las intensidades de estos colores decrecen hasta cero, y el cristal se presenta negro en la posición de extinción.

## EXAMEN CONOSCÓPICO (FIGURAS DE INTERFERENCIA)

Vistas con el microscopio preparado como un conoscopio, las figuras de los cristales anisótropos que se habían visto con el ortoscopio han sido sustituidas por dibujos de colores de interferencia que proporcionan mayor información y que se denominan *figuras de interferencia*. Éstas se forman por

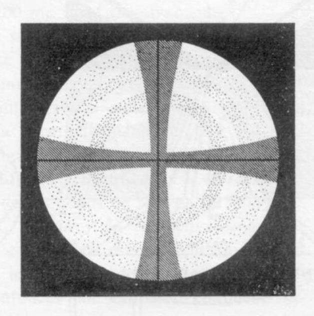


FIGURA 7-12

**Figura de interferencia de un cristal uniáxico orientado de tal forma que su eje óptico sea perpendicular al plano de la platina del microscopio. El centro común del cruce de las isogiras (sombreado) y los círculos isocromos (punteado) representa el punto de salida de los rayos que se desplazan a lo largo del eje óptico.**

rayos que se propagan a lo largo de diferentes direcciones, mientras el cristal se está observando. Una observación precisa de las figuras de interferencia proporciona una suma considerable de datos ópticos en un mínimo de tiempo. En los cristales uniáxicos la figura de interferencia consiste en dos barras negras que se cortan —o, como se denominan, isogiras— que forman una cruz (fig. 7-12) que recuerda la cruz Formée de heráldica. Esta cruz es concéntrica con una serie de círculos que, si la luz que se ha empleado para iluminar el cristal es monocromática, representan alternancias de oscuridad y claridad para dicha luz. Si se ilumina con luz blanca, representan distribuciones circulares de los colores de interferencia de la figura 8-17 (intercalada entre las páginas 164-165); los círculos interiores están señalados por colores de orden cada vez más bajo. Puesto que cada uno de los círculos une puntos de igual color de interferencia, los círculos se denominan usualmente curvas isocromáticas, o más brevemente *isocromas*. El centro común de la cruz negra y de las isocromas, es un punto negro (melatopo), que marca en el

campo visual del microscopio la salida de los rayos que se han propagado dentro del cristal a lo largo de su eje óptico.

## Origen de las isocromas; conos de igual retardo

Considérese el cristal cuya figura de interferencia está dibujada en la figura 7-12. Los rayos 1 y 2 en un corte transversal (fig. 7-13A) representan dos de los rayos del cono de luz, infinitamente aproximados, por tanto, son esencialmente paralelos (7). Después de penetrar en el cristal, sus rayos *E* y *O* se propagan según trayectorias separadas. Por tanto, imagínese que la distancia entre los rayos 1 y 2, que está muy exagerada en la figura 7-13A (como lo

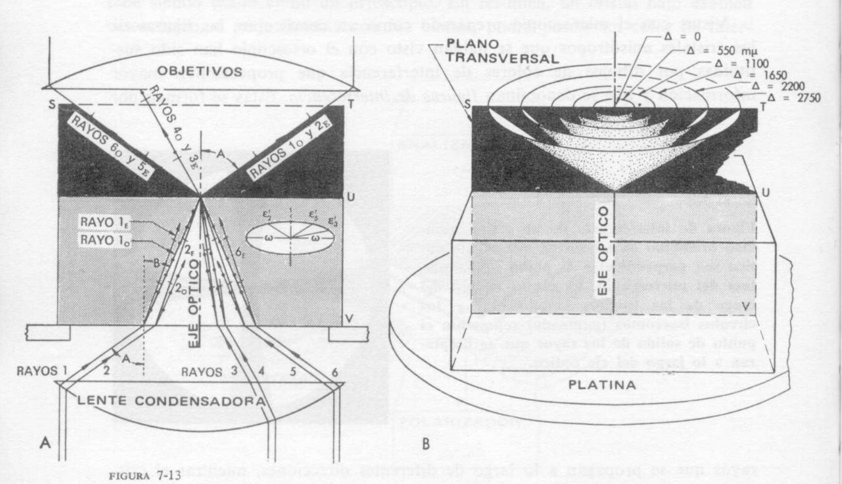



FIGURA 7-13

**(A) Vista transversal de un cristal uniáxico, iluminado conoscópicamente, cuyo eje óptico sea perpendicular a la platina. (B) Conos de igual retardo para lo mismo, en perspectiva. STUV es el plano de la sección dibujada en (A). El espesor del cristal se ha exagerado mucho.**

está el espesor del cristal), es tal que el rayo *O* del rayo 1 (es decir el rayo $1_O$) y el rayo *E* del rayo *a* (es decir el rayo $2_E$) se desplazan una trayectoria igual después de su salida del cristal. Así interfieren de acuerdo con la diferencia de trayectoria producida entre ellos al atravesar el cristal. En la figura 7-13A, el rayo $1_O$ está retrasado $5\lambda$ con respecto a $2_E$ después de su salida, puesto que para pasar a través del cristal, el rayo $1_O$ requiere ocho períodos, y el rayo $2_E$ solamente tres.

(7) De la misma forma que dos rayos cercanos opuestos a un arco de círculo infinitamente pequeño, son paralelos.

De igual forma considérense dos rayos paralelos que se desplacen formando un ángulo menor con el eje óptico —por ejemplo los rayos 3 y 4—. Después de salir, los rayos $4_O$ y $3_E$ interfieren de acuerdo con la diferencia de trayectoria. Es obvio que la diferencia entre las trayectorias de los rayos $4_O$ y $3_E$ no es tan grande como entre $1_O$ y $2_E$ puesto que: 1) no atraviesan un espesor tan grande de cristal, y 2) la diferencia de sus índices de refracción ($\omega - \epsilon'_3$) es menor que la de los rayos 1 y 2 —es decir ($\omega - \epsilon'_2$)—. Así se llega al principio de que la diferencia de fase entre los rayos *E* y *O* después de su salida es proporcional al ángulo entre su trayectoria común y el eje óptico del cristal. Por tanto, para los rayos que se trasladan paralelos al eje óptico, antes y después de la salida (véanse págs. 97-98), el retardo es cero. La diferencia de trayectoria —es decir, su retardo— entre los rayos $6_O$ y $5_E$, cuyo ángulo con el eje óptico es semejante al de los rayos $1_O$ y $2_E$ equivale precisamente al retardo que existe entre los rayos $1_O$ y $2_E$. Consideradas tridimensionalmente, todas las trayectorias de los rayos que formen un ángulo igual con el eje óptico, constituyen un cono de igual retardo; en la figura 7-13B solamente se han dibujado cinco conos, uno que une todos los rayos *E* y *O* cuyo retardo es de 550 m$\mu$; un segundo para 1100 m$\mu$ y así sucesivamente.

El origen de las isocromas circulares se comprende fácilmente si se considera que una figura de interferencia se forma llevando al foco todos los rayos que se desplazan a lo largo de conos de igual retardo sobre el cristal. Así, una figura de interferencia puede interpretarse como una visualización de la intersección de estos conos con la superficie plana superior del cristal ([8]). Por ejemplo, si el cristal de la figura 7-13B estuviera iluminado por luz de longitud de onda de 550 m$\mu$ la diferencia de trayectoria entre los rayos *E* y *O* que se trasladarán a lo largo de los conos de retardo 0, 550, 1100, 1650, 2200 y 2750 m$\mu$ sería $0\lambda$, $1\lambda$, $2\lambda$, $3\lambda$, $4\lambda$ y $5\lambda$ respectivamente. Por consiguiente (pág. 114) la resultante de estos rayos está completamente extinguida en el analizador (supuestos los nicoles cruzados), y las intersecciones de estos conos estarían marcadas entonces por extinción completa. Intermedios entre estos círculos de oscuridad, están las intersecciones de los conos de retardo, 275, 825, 1375, 1925 y 2475 m$\mu$ (estos conos no se han dibujado en la figura 7-13B). Para la luz de longitud de onda de 550 m$\mu$ estos conos corresponden a diferencias de fase de $\frac{1}{2}\lambda$, $1\frac{1}{2}\lambda$, $2\frac{1}{2}\lambda$, $3\frac{1}{2}\lambda$ y $4\frac{1}{2}\lambda$. Por tanto sus intersecciones son posiciones de claridad. Nótese que todos estos círculos son concéntricos, y que el eje óptico emerge en el punto común. Los radios aproximados de los círculos correspondientes a retardos de $2\lambda$, $3\lambda$, $4\lambda$, ..., $n\lambda$ son proporcionales relativamente a $\sqrt{2}\,r$, $\sqrt{3}\,r$, $\sqrt{4}\,r$, ..., $\sqrt{n}\,r$ donde $r$ es el radio del círculo de retardo $1\lambda$.

Si la iluminación se hace con luz blanca, entonces la salida de cada cono de igual retardo está marcada por una isocroma circular, compuesta por el color de interferencia correspondiente a este retardo. En la figura 7-13B, por

([8]) El estudiante más avanzado puede considerar las ideas, técnicamente más precisas, de Kamb (1958, pág. 1032) según las cuales los fenómenos de interferencia se producen esencialmente en la esfera focal de la lente del objetivo; la visión de la esfera focal a través del ocular es por tanto la de su plano horizontal.

ejemplo, las isocromas del rojo de 1.^er^ orden, de 2.° orden, de 3.°, de 4.° orden y de 5.° orden estarán marcadas respectivamente por las salidas de los conos de retardo de 550, 1100, 1650, 2200 y 2750 m$\mu$. De igual forma los conos que corresponden a valores de retardo intermedios entre éstos, darán lugar a isocromas marcadas por colores de interferencia (véase fig. 8-17) intermedios entre estos colores rojos.

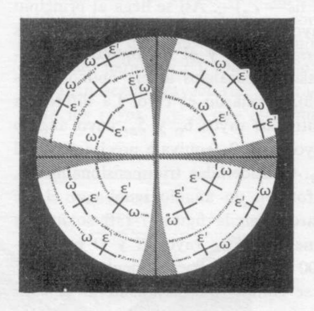


FIGURA 7-14

**Direcciones de vibración de los rayos E y O que emergen en el campo del microscopio, de una figura de interferencia uniáxica. Se supone que estos rayos no interfieren después de su salida del cristal.**

A veces es conveniente suponer que los rayos *E* y *O* que emergen del cristal, no interfieren entre sí, sino que actúan como entidades independientes. Con este supuesto, nótese al estudiar la figura 7-13, que el rayo *E* vibra perpendicular a los conos de igual retardo, mientras que el rayo *O* vibra tangencialmente a ellos (pero perpendicular a la vibración del rayo *E*). De igual forma, si suponemos esto, pueden considerarse que: todos los rayos *O* en una figura de interferencia uniáxica (fig. 7-14) vibran tangencialmente a las

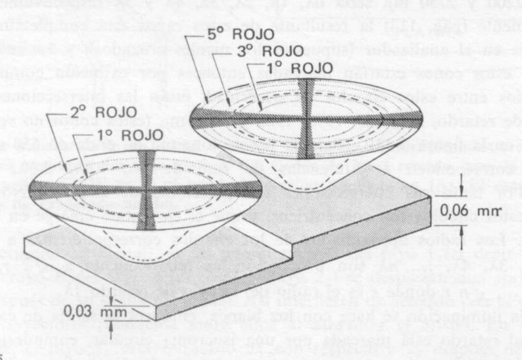



FIGURA 7-15

**Comparación del número de isocromas, visto en el campo del microscopio, para dos diferentes espesores de calcita. Si se sustituye un objetivo de N. A. 0,65 por el obejtivo de N. A. 0,85, sólo podrá verse la porción de la figura de interferencia comprendida dentro de los círculos de trazos.**

isocromas, mientras que los rayos *E* vibran paralelos a los radios de las isocromas circulares.

Las figuras de interferencia de cristales de alta birrefringencia ($\epsilon - \omega$) poseen más isocromas que las de los cristales de baja birrefringencia. Esto también se cumple para una sección gruesa comparada con otra sección más fina del mismo mineral (fig. 7-15). Cuanto mayor sea la apertura numérica del objetivo usado, más abierto será el cono de luz que procedente del cristal penetra en el objetivo. Los conos dibujados sobre el cristal en la figura 7-15 son los que penetrarán en un objetivo de N. A. 0,85. Si se usa un objetivo de N. A. 0,65, solamente penetrará en el objetivo el cono de trazos; por consiguiente, sólo esa porción de la figura de interferencia que cae dentro del cono de trazos podrá ser observada. Según esto es preferible el empleo de objetivos de N. A. 0,85.

## Origen de las isogiras

Un cono de luz procedente del polarizador se compone de rayos que, si se desprecia la rotación de sus direcciones de vibración, por pérdidas debidas a la reflexión en sus superficies, vibran todos paralelos a la dirección privilegiada del polarizador —es decir N-S para la mayoría de los microscopios—. Después de su paso a través de un cristal uniáxico los rayos del cono de luz que emergen vibran ahora en diversas direcciones, como los rayos *E* y *O* y su subsecuente interferencia después de la salida. Los rayos, que han conservado la dirección N-S o casi N-S, quedarán por tanto extinguidos o casi extinguidos en el analizador. Los lugares de emergencia en el campo del microscopio están marcados por áreas en forma de cuñas extinguidas, comúnmente denominadas isogiras.

La forma de las isogiras se hace comprensible si se determinan las direcciones de vibración de los rayos que emergen en varios puntos en el campo de visión. Para permitir un aumento mayor considérese sólo un cuadrante de un cono de luz que emerja de la superficie superior de un cristal, cuyo eje óptico sea perpendicular a la platina del microscopio (fig. 7-16A). Dentro de este cono sólo se han dibujado los conos de igual retardo $1\lambda$, y $1\frac{1}{2}\lambda$. Obsérvese el plano *OSS'*: los que están a 10°, 45° y 90° de él representan las prolongaciones sobre el cristal de unos pocos planos principales, siendo *OSS'* paralelo a la dirección privilegiada del polarizador. Las intersecciones de los conos y de los planos marcan las trayectorias de los rayos representativos 1 al 8 en el cono de luz que sale del cristal. De éstos, los rayos 2, 3, 6 y 7 están formados por la intersección de un rayo *O* y un rayo *E* cuyas direcciones de vibración fueran $V'_O$ y $V'_E$ después de su salida sobre la superficie superior del cristal. La dirección de vibración de tales rayos resultantes, como se muestra por los rayos 2, 3 y 7 en la figura 7-16A, es entonces $V_C$, el vector suma de $V'_O$ y $V'_E$.

La dirección de este vector suma, $V_C$, se representa por una flecha entera de doble cabeza, para los rayos 1 al 8 en sus puntos de emergencia, en

la figura 7-16B. La figura 7-16B puede considerarse alternativamente como el plano *SOW* en la figura 7-16A o como un cuadrante de la figura uniáxica de interferencia en la cual el eje óptico emerge en *O*, la intersección del retículo. La dirección de $V_C$ se determina vectorialmente como sigue. En los

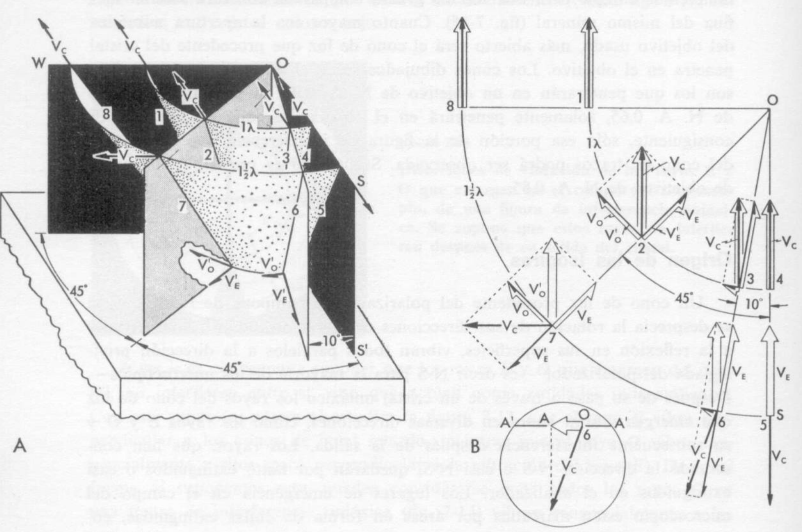



FIGURA 7-16

**(A) Vista aumentada de una porción de los conos de igual retardo sobre el cristal de la figura 7-13 B, suponiendo que se ilumina con luz de 550 mμ de longitud de onda. El cono $1\frac{1}{2}\lambda$ y las prolongaciones de los cuatro planos principales por encima del cristal se han añadido, siendo el plano OSS′ paralelo a la dirección privilegiada del polarizador. Las direcciones de vibración de los rayos E y O, $V_E$ y $V_O$, se indican en sus puntos de salida en la superficie superior del cristal. Después de la salida, cada par de rayos E y O, que se trasladan a lo largo de las trayectorias 1 a 8, interfieren mutuamente para producir una nueva dirección de vibración $V_C$. (B) Vista completa del plano horizontal WOS de la figura 7-16 A. La historia de cada rayo se indica de forma vectorial en un punto de emergencia en el plano. Así, las flechas huecas de cabeza simple indican las direcciones de vibración del rayo O y del rayo E —que es, $V_O$ y $V_E$—, en las cuales la luz incidente que procede del polarizador (flechas huecas de cabeza doble) se descompone después de penetrar en el cristal y en su superficie inferior. Las flechas enteras de cabeza simple $V'_E$ y $V'_O$ representan las vibraciones de los rayos E y O justamente a su salida de la superficie superior del cristal. La flecha entera de doble cabeza, $V_C$, indica la dirección de vibración del rayo que emerge del cristal, rayo que es resultado de la interferencia de los rayos E y O después de su salida del cristal. El esquema circular muestra a OA, la dirección de vibración y amplitud del componente de la flecha $V_C$ que es transmitido por el analizador (dirección privilegiada AA′) cuando el rayo 6 lo atraviesa.**

puntos de emergencia de los rayos 1 al 8, véanse las flechas huecas de doble cabeza que representan la amplitud y la dirección de vibración de los rayos que entran en el cristal procedentes del polarizador. Las flechas huecas de una sola cabeza, $V_O$ y $V_E$ representan lo mismo para los rayos *O* y *E* en que estos rayos originales quedan divididos después de entrar en el cristal. Nótese que $V_E$ es siempre paralelo y $V_O$ es siempre perpendicular a la traza del

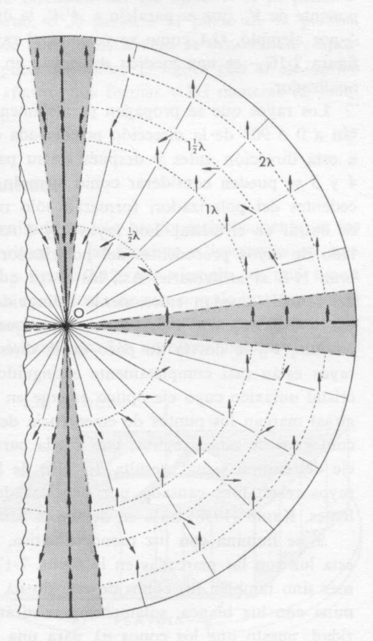



FIGURA 7-17

**Direcciones de vibración de los rayos resultantes en sus puntos de salida de una figura de interferencia uniáxica (algo más de la mitad derecha del campo visual queda representado en la figura). El melatopo está colocado en O, el centro del retículo. Todos los rayos que emergen en o cerca de los hilos de retículo vibran en el mismo plano (N-S) que la luz que procede del polarizador. Tales rayos quedan extinguidos por un analizador E-O y sus puntos de emergencia están por tanto marcados por áreas oscuras —es decir isogiras— delimitadas de forma grosera como puede verse. Los círculos 1 λ y 2 λ, si la iluminación se hiciera con luz monocromática, serían los lugares de emergencia de los rayos que únicamente vibraran N-S y vendrían señalados por anillos negros (no está indicado).**

plano principal *(OS, OP, OQ,* o *OW)* en el cual se desplaza el rayo. Las flechas rellenas de una sola cabeza, $V'_E$ y $V'_O$ —que representan las direcciones de vibración y las amplitudes de los rayos después de su paso a través del cristal— se han dibujado opuestas a $V_E$ o $V_O$ si, en la salida, cualquier rayo no está en fase (véase pág. 114) con el que lo estaba a la entrada. Así, en el cono $1\frac{1}{2}\lambda$, $V'_E$ ha sido invertido con respecto a $V_E$ (9). Después de salir del cristal, los rayos *E* y *O* interfieren para producir un rayo compuesto cuyo «vector de vibración», $V_C$, es el vector suma de $V'_O$ y $V'_E$. Para todos los rayos que emergen según conos de retardo 1λ (o $n\lambda$), nótese que $V_C$ es N-S; los rayos compuestos que se desplazan a lo largo de estos conos vibran tam-

(9) Estos convencionalismos han sido explicados en las figuras 7-4 A y 7-4 B de la página 115.

bién N-S. Para los rayos que emergen en los conos $1\frac{1}{2}\lambda$ —o $(n + \frac{1}{2})\lambda$—, $V_C$ forma un ángulo $2x$ con la dirección privilegiada del polarizador (*OS*), donde $x$ está definido como el ángulo entre *OS* y la traza del plano principal que contiene al rayo. Por ejemplo, para los rayos 5, 6, 7 y 8, $x$ equivale respectivamente a 0°, 10°, 45° y 90°. Así $V_C$, su dirección de vibración después de salir del cristal, está respectivamente a 0°, 20°, 90° y 180° de *OS*. El componente de $V_C$ que es paralelo a $A'A'$, la dirección privilegiada del analizador —por ejemplo, *OA* como se ve para el rayo 6 en el esquema circular de la figura 7-16— es una medida del grado en que el rayo es transmitido por el analizador.

Los rayos que se propagan paralelamente a los planos principales que están a 0 ó 90° de la dirección privilegiada del polarizador, vibrarán paralelos a esta dirección antes y después de su paso a través del cristal. Los rayos 4 y 5 se pueden considerar como ejemplo, los rayos que los producen, procedentes del polarizador, formarán sólo rayos *E* que vibrarán N-S después de entrar en el cristal. Los rayos 1 y 8 son también ejemplos; son el resultado de rayos procedentes del polarizador que forma sólo rayos *O* que vibran N-S al atravesarle. Así, los rayos que emergen a lo largo de los hilos del retículo quedan enteramente extinguidos por el analizador. Para los rayos que emergen a lo largo de radios que forman pequeños ángulos con el retículo, $V_C$ se desvía un poco de la dirección N-S; por consiguiente, estos rayos están casi completamente extinguidos por el analizador. Así, para un cristal uniáxico cuyo eje óptico emerge en *O* (fig. 7-17), las áreas negras (isogiras) marcan los puntos de emergencia de dichos rayos. La curvatura de los contornos de estas isogiras, que queda particularmente de manifiesto junto al eje del campo visual, resulta del giro de las direcciones de vibración de los rayos resultantes causado por pérdidas de reflexión en la superficie de las lentes. Kamb (1958) trata en detalle la causa de esta curvatura.

Si se ilumina con luz monocromática, y las diferencias de trayectoria de esta luz son las marcadas en la figura 7-17, no solamente las aspas cuneiformes sino también los conos de retardo $n\lambda$ serán áreas de extinción. Si se ilumina con luz blanca, solamente persistirán las isogiras como áreas de oscuridad, puesto que los conos $n\lambda$ para una longitud de onda en la luz blanca coincidirán a menudo con el cono $(n + \frac{1}{2})\lambda$ de cualquier otra longitud de onda en la luz blanca. De aquí que, con luz blanca, no haya círculos negros que indiquen la emergencia de los conos $n\lambda$ en el campo de visión. Los rayos que emergen según círculos intermedios entre $n$ y $(n + \frac{1}{2})\lambda$ estarán polarizados elíptica o circularmente; éstos no van a ser tratados aquí.

La línea central de una isogira de una figura de interferencia marca la traza de un plano principal que es paralelo o bien perpendicular a la dirección de la luz que procede del polarizador. La intersección entre dos líneas centrales marca el punto de salida en el campo del microscopio, de los rayos que mientras estaban en el cristal se desplazaban a lo largo del eje óptico.

## TIPOS DE FIGURAS DE INTERFERENCIA UNIÁXICA

La apariencia de una figura de interferencia uniáxica depende de la posición del grano con respecto a la dirección del eje óptico: 1) perpendicular; 2) formando un ángulo oblicuo, o 3) paralelo al plano de la platina. Los tipos de figuras que resultan de tales orientaciones se denominan respectivamente: 1) figura con el eje óptico centrado; 2) figura con el eje óptico no centrado, y 3) figura uniáxica «flash». Sus formas y las maneras de reconocerlas se tratarán a continuación.

### Figuras con el eje óptico centrado

Las figuras con el eje óptico centrado se han usado exclusivamente en las primeras discusiones acerca del origen de las isogiras e isocromas en una figura de interferencia uniáxica. La figura 7-12, por ejemplo, es una figura típica con el eje óptico centrado. La condición *sine qua non* de una figura con el eje óptico centrado es la localización de su melatopo (que marca la salida del eje óptico) en la intersección del retículo. Un corolario necesario es que

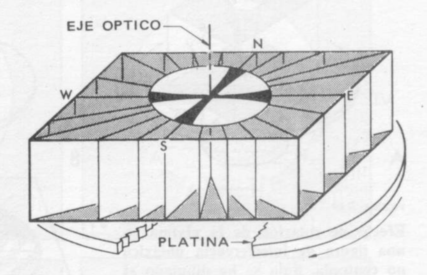



FIGURA 7-18

**Constancia de la posición de las isogiras (durante la rotación de la platina) en la figura de interferencia de un cristal cuyo eje óptico es normal a la platina del microscopio. Sólo se han dibujado algunos de los innumerables planos principales que contienen al eje óptico.**

los brazos N-S y E-O de la cruz uniáxica estén respectivamente bisecados por los retículos N-S y E-O. El giro de la platina del microscopio no producirá un cambio aparente en la forma de una figura con el eje óptico centrado que sea perfecta. Por tanto, no importa que se gire la platina que soporta el cristal en la figura 7-18, puesto que siempre uno de los innumerables planos principales que irradian hacia el exterior a partir del eje óptico (algunos de los cuales se han dibujado) cortará el campo de visión del microscopio a lo largo de cada uno de los hilos del retículo y será el lugar donde aparecerá una isogira; por tanto, las isogiras permanecerán en las posiciones que se muestran en la figura 7-18.

## Figuras con el eje óptico no centrado

Estas figuras se producen si el eje óptico se desvía de la perpendicularidad a la platina un ángulo $\nu$ (nu) (fig. 7-19A). El melatopo, por consiguiente, no coincidirá ya con la intersección del retículo, más aún, durante la rotación de la platina se observa que el melatopo gira en la misma dirección (figuras 7-19B, C). Las isogiras, mientras tanto, conservan (como siempre) un paralelismo aproximado con los hilos del retículo, coincidiendo su mutua intersección con el melatopo en todo momento. Las isocromas reaparecen como círculos centrados en el melatopo. Las isogiras y las isocromas tienen el mis-

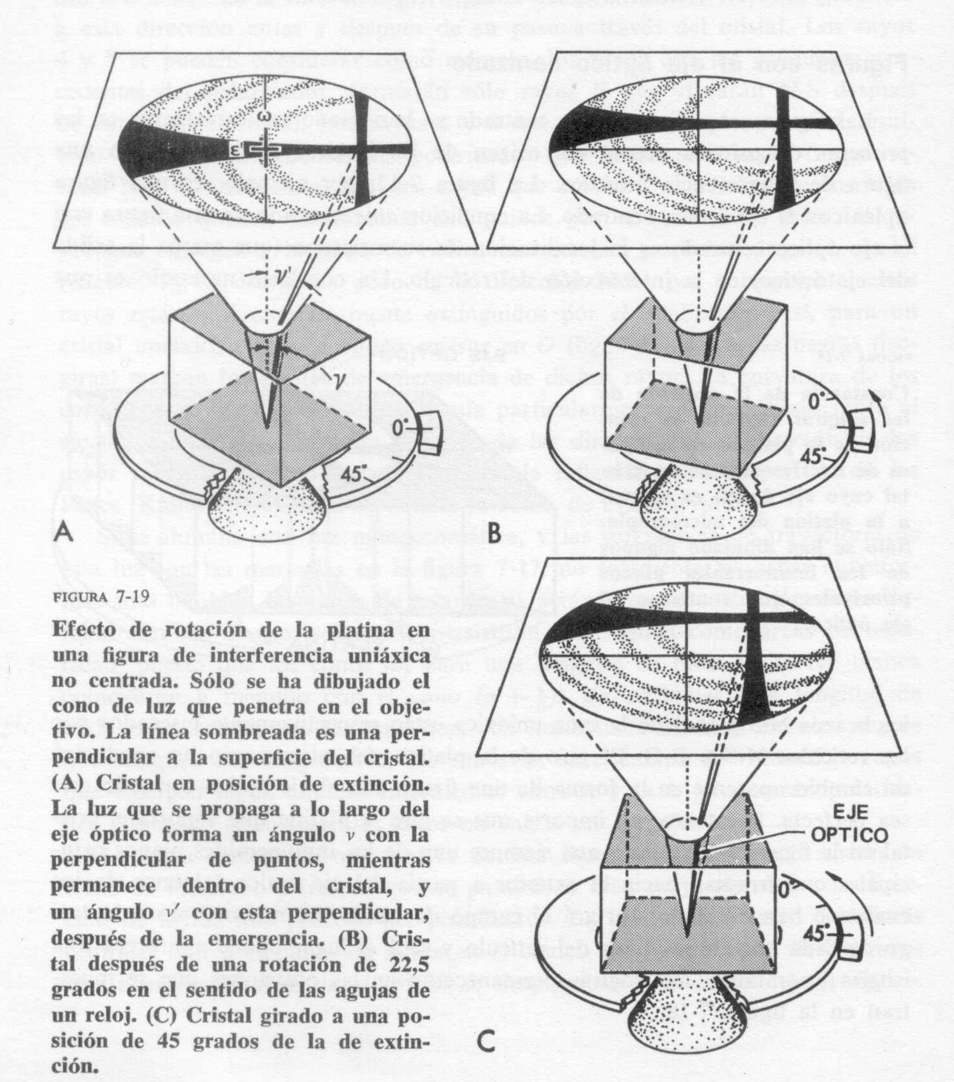



FIGURA 7-19

**Efecto de rotación de la platina en una figura de interferencia uniáxica no centrada. Sólo se ha dibujado el cono de luz que penetra en el objetivo. La línea sombreada es una perpendicular a la superficie del cristal. (A) Cristal en posición de extinción. La luz que se propaga a lo largo del eje óptico forma un ángulo $\nu$ con la perpendicular de puntos, mientras permanece dentro del cristal, y un ángulo $\nu'$ con esta perpendicular, después de la emergencia. (B) Cristal después de una rotación de 22,5 grados en el sentido de las agujas de un reloj. (C) Cristal girado a una posición de 45 grados de la de extinción.**

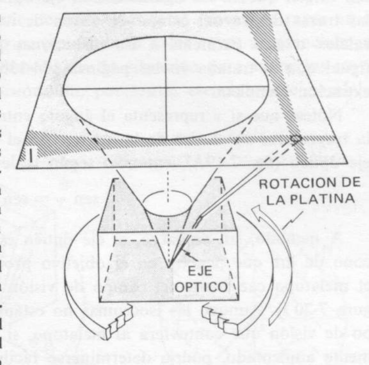



FIGURA 7-20

**Cristal que produce una figura con el eje óptico no centrado, por lo cual el melatopo cae fuera del campo del microscopio. (II), (III) y (IV) Movimiento de la isogira al girar el cristal en el sentido de las agujas del reloj. Los extremos opuestos de la isogira visible —es decir H y A— se mueven respectivamente de $H_{II}$ a $H_{IV}$ y de $A_{II}$ a $A_{IV}$ con el giro. Puesto que la traslación de $H_{II}$ a $H_{IV}$ supone un movimiento en la misma dirección en que fue girado el cristal (en el sentido de las agujas del reloj, en este ejemplo) el extremo H se denomina extremo homodromo. El extremo denominado A se llama el extremo antidromo de la isogira puesto que el movimiento de $A_{II}$ a $A_{IV}$ es inverso a la dirección de vibración del cristal.**

mo origen que en las figuras con el eje óptico centrado. Las isogiras marcan las trazas dentro del campo de visión de los planos principales que son paralelos o casi paralelos a las direcciones privilegiadas de los nicoles. Así (igual que se trataba en las páginas 134-135) estas trazas son los lugares de extinción completa.

Nótese que si $\nu$ representa el ángulo entre la perpendicular a la platina y la trayectoria en el aire de la luz que en el cristal se desplaza a lo largo del eje óptico (fig. 7-19A), entonces según la ley de Snell

$$\omega \text{ sen } \nu = \text{sen } \nu'$$

A menudo, sin embargo, el eje óptico es tan oscilante que cae fuera del cono de luz que penetra en el objetivo procedente del cristal. En este caso, el melatopo cae fuera del campo de visión de la figura de interferencia (figura 7-20 I). Aunque las isocromas no están presentes, el cuadrante del campo de visión que contuviera al melatopo, si el campo estuviera lo suficientemente aumentado, podría determinarse fácilmente. Gírese el cristal de la figura 7-20 I en dirección contraria a las agujas del reloj y obsérvese la figura de interferencia. Una isogira penetra en el campo de visión como en la figura 7-20 II. Continuando la rotación del cristal en el mismo sentido, la figura de interferencia va tomando sucesivamente el aspecto de la figura 7-20 III, IV y V. De los segmentos de la isogira en el campo de visión, denomínese el extremo más cercano al melatopo con la letra $H$ y el extremo más lejano del melatopo con la letra $A$. Durante la rotación del cristal en sentido contrario a las agujas del reloj, nótese que $H$, una de las intersecciones de la isogira con el borde del campo de visión, también se mueve en el mismo sentido (a partir de $H_{II}$, a $H_{III}$, a $H_{IV}$ en la figura 7-20 IV), mientras que el extremo opuesto de la isogira se mueve según las agujas del reloj (de $A_{II}$, a $A_{III}$, a $A_{IV}$). El extremo $H$, puesto que siempre se mueve en la misma dirección en que gira el cristal, se denomina *extremo homodromo* (gr., igual curso o camino) de la isogira; el extremo $A$, puesto que se mueve en dirección opuesta a la rotación del cristal, se denomina *extremo anisodromo* (gr., camino opuesto).

*Un melatopo, fuera del campo de visión, está siempre colocado en aquel cuadrante que contiene el extremo homodromo y una porción visible de la isogira.* Si hay en el campo de visión segmentos de isocromas circulares, el melatopo estará localizado en el cuadrante que contiene el centro de estos círculos.

## Figuras flash

Una figura flash es la figura de interferencia producida por un cristal cuyo eje óptico es paralelo (o casi paralelo) al plano de la platina del microscopio (fig. 7-21A). Los rayos que penetran en el cristal procedentes del cono de iluminación se desplazan según un número infinito de planos principales que irradian del eje óptico; sólo unos pocos de estos planos están

representados en la figura. Estos planos emergen dentro del plano de la figura de interferencia como una serie de trazas paralelas (líneas de rayas en la figura 21-B). Los rayos *O* vibran perpendiculares a los rayos *E*, esencialmente paralelos a estas líneas. Las direcciones de vibración para todos los rayos que emergen en el campo de visión son, por tanto, esencialmente paralelas

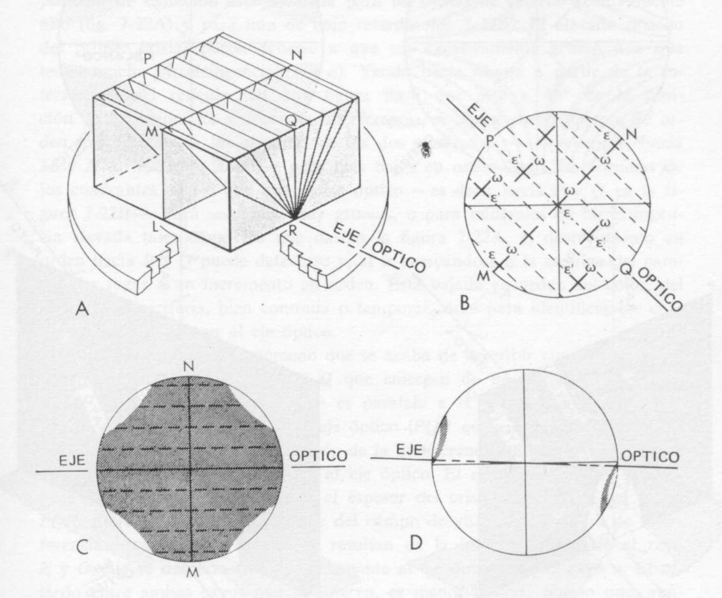



FIGURA 7-21

**Origen de una figura «flash» uniáxica. (A) Cristal cuyo eje óptico está idealmente orientado para dar una figura «flash» uniáxica. Los planos que contienen el eje óptico son planos principales. (B) Paralelismo mutuo de las trazas de estos planos principales dentro del campo visual de esta figura de interferencia, estando el eje óptico a 45° de la posición de extinción. Se han dibujado las direcciones de vibración de algunos rayos que emergen en el campo. Nótese el paralelismo de estas vibraciones. (C) Aspecto de la isogira en la posición de extinción. (D) Aspecto de la isogira si se gira ligeramente el cristal de la posición anterior.**

entre sí. Por consiguiente, si el cristal se gira hasta que el eje óptico esté paralelo a la dirección privilegiada de un nicol, el campo de visión estará casi por completo ocupado por una cruz negra difusa (fig. 7-21C). Sólo en el extremo NE, SE, SO, NO, esquinas del campo de visión, no se observa extinción, una indicación de que las vibraciones de los rayos que salen en esas regiones no son paralelas a las vibraciones de la mayoría de los rayos del cam-

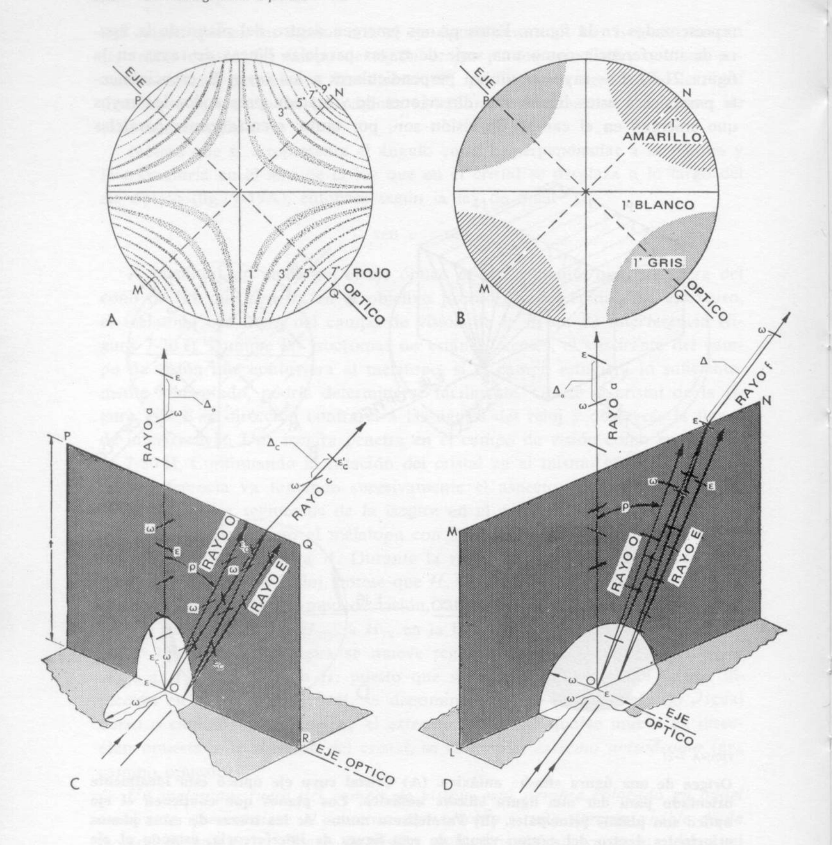



FIGURA 7-22

**(A) Distribución de las isogiras de una figura «flash» uniáxica a 45° de la posición de extinción en un mineral de birrefringencia alta. (B) Lo mismo para una figura de birrefringencia baja. Nótese, que al distanciarse del centro del retículo, los colores de interferencia se hacen progresivamente de orden más elevado hacia los puntos M y N, mientras que decrecen de orden hacia P y Q, estas áreas de colores de orden más bajo marcan los cuadrantes en los que yace el eje óptico. La razón de la aparición de un color de retardo más bajo en Q que en N, está explicada en (C) y (D), donde los planos PQR y LMN representan secciones transversales de la figura 7-21 A. En ambos (C) y (D) el valor del índice de refracción y la dirección de vibración de cada rayo está indicada por vectores que son perpendiculares o están contenidos en los planos sombreados oscuros. Las intersecciones de estos planos verticales con la indicatriz del cristal están sin sombrear.**

po. Al girar el cristal sólo un grado, la cruz difusa se descompone en isogiras hiperbólicas que salen del campo de visión por los cuadrantes que contienen el eje óptico después de este giro (fig. 7-21D). La dirección del movimiento de estas isogiras, es sin embargo difícil de determinar algunas veces.

La distribución de las isocromas en una figura flash uniáxica a 45° de la posición de extinción está indicada para un cristal de retardo relativamente alto (fig. 7-22A) y para uno de bajo retardo (fig. 7-22B). El elevado retardo del primer cristal puede deberse a que sea excesivamente grueso o a que tenga mucha birrefringencia ($\varepsilon - \omega$). Yendo hacia afuera a partir de la intersección del retículo, en una figura flash que esté a 45° de la posición de extinción, los colores de interferencia se hacen sucesivamente de orden más alto hacia las esquinas de los dos cuadrantes —por ejemplo, hacia *M* y *N* en la figura 7-22B— pero más bajos en orden hacia las esquinas de los cuadrantes en los que está el eje óptico —es decir hacia *P* y *Q* en la figura 7-22B—. Para secciones muy gruesas, o para minerales de birrefringencia elevada tales como los que darían la figura 7-22A, el decrecimiento en orden hacia *P* y *Q* puede detenerse y, al ir acercándose a la esquina del campo, dar lugar a un incremento en orden. Esta bajada en orden del color, del centro a la periferia, bien continua o temporal, sirve para identificar los cuadrantes que contienen al eje óptico.

Para comprender el fenómeno que se acaba de describir considérese la interferencia entre los rayos *E* y *O* que emergen de un cristal conoscópicamente iluminado, cuyo eje óptico es paralelo a la platina del microscopio. En un plano vertical paralelo al eje óptico (*PQR* en la figura 7-22C), nótese que el rayo vertical *a* es el resultado de la interferencia entre los rayos *O* y *E* que se desplazan perpendiculares al eje óptico. El retardo para este rayo es pues $\Delta_a = (\varepsilon - \omega)\, t$, donde *t* es el espesor del cristal. Los rayos del plano *PQR* que emergen juntos al borde del campo de visión en la figura de interferencia —rayo *c* por ejemplo— resultan de la interferencia entre el rayo *E* y *O* que se desplaza más paralelamente al eje óptico que el rayo *a*. El retardo entre ambos rayos que interfieren, es menor que $\Delta_a$ puesto que, aunque recorren una distancia mayor en el cristal, la diferencia de sus índices ($\epsilon'_c - \omega$) es de mucho menos valor que ($\epsilon - \omega$). Así *PQ*, la traza del plano *PQR* en la figura de interferencia, es el emplazamiento de los colores de interferencia de orden decreciente del centro a la periferia. A veces, particularmente en cristales gruesos o de birrefringencia alta, el incremento de la longitud de la trayectoria de los rayos, en grandes inclinaciones con respecto a la vertical, es mayor que la disminución de la birrefringencia, y como resultado los colores de interferencia crecen de orden.

En un plano como *LMN* (fig. 7-22D), que es perpendicular al eje óptico, todos los rayos *E* que se desplazan contenidos en él vibran paralelos al ejè óptico y están por tanto asociados a un índice de refracción $\epsilon$. En consecuencia, la birrefringencia entre todos los pares de rayos *E* y *O* que interfieren después de su emergencia a partir del plano *LMN* del cristal, será invariablemente ($\epsilon - \omega$), sea cual sea su inclinación. Con mayor inclinación aumenta la trayectoria de estos rayos en el cristal y por consiguiente su retar-

do también aumenta. Por ejemplo, el retardo del rayo $f$ en la figura 7-22D, es aproximadamente $\Delta_f = (\epsilon - \omega)\ (t/\cos\rho)$, donde $\rho$ puede considerarse como el ángulo de inclinación con respecto a la vertical que forman el rayo $E$ o el rayo $O$, que son los que interfieren para formar el rayo $f$; el ángulo entre ambos rayos es generalmente muy pequeño. Así $\Delta_f$ excede paulatinamente el valor $\Delta_a$ al incrementar el ángulo $\rho$. Por consiguiente $MN$, la traza del plano $LMN$ en las figuras de interferencia flash, es el emplazamiento de los colores de interferencia que aumentan de orden del centro hacia afuera.

# 8

# Estudio óptico de los cristales uniáxicos

## PREPARACIÓN DE LA MUESTRA

Los cristales pulverizados deben tamizarse con el fin de aislar, para su estudio, la fracción de 100 a 120 mallas. El espesor del grano, como resultado, está comprendido la mayoría de las veces en el intervalo de 0,125 a 0,149 mm. Los montajes en aceite de estos granos machacados se preparan como se ha descrito previamente (pág. 74).

## COMPROBACIÓN DE LA UNIAXIALIDAD

Los granos descansan en el aceite según varias superficies de fractura que, a no ser que haya una exfoliación dominante, estarán formando toda una serie de ángulos posibles con el eje óptico. Los granos para los que la superficie de reposo está casi perpendicular al eje óptico, van a dar una figura de interferencia cuyo melatopo cae dentro del campo de visión. Una vez visto el melatopo así, la naturaleza uniáxica del cristal que proporciona la figura de interferencia puede establecerse fácilmente puesto que la cruz Formée (formada por la intersección de las isogiras) permanecerá invariable —es decir, no se descompondrá en una hipérbola— durante el giro de la platina. El grano que proporcione, con mayor aproximación, una figura con el eje óptico casi centrado se determinará entre nicoles cruzados examinando el montaje del polvo con un objetivo de pequeño aumento. Tal grano se caracteriza: 1) por ser uno de los granos más anchos, y 2) por ser un color de interferencia más bajo en su centro o parte más gruesa, que los otros granos. Para tales granos el índice $\epsilon'$ será necesariamente de valor semejante a $\omega$. Si los valores son muy cercanos entre sí, el centro del grano presentará un color de interferencia negro de primer orden en todas las posiciones del giro (puesto

que [$\epsilon' - \omega$] será mínimo). Tal grano está cortado según una superficie casi paralela a la sección circular. Por consiguiente, el melatopo de su figura de interferencia estará centrado (o casi centrado) en el campo de visión.

## COMPENSACIÓN

### Láminas, cuñas y accesorios

En mineralogía óptica se usan comúnmente tres accesorios: 1) la cuña simple de cuarzo (o una variante); 2) una lámina de yeso o el rojo de primer orden, y 3) una lámina de mica de un cuarto de onda. Cada uno de ellos está diseñado para deslizarse en la abertura accesoria del microscopio de forma que intercepte y transmita todos los rayos luminosos. Igual que todas las placas anisótropas, cada una posee dos direcciones privilegiadas perpendiculares entre sí. Una corresponde al índice de refracción mayor *N* y se denomina dirección lenta, y la que corresponde al índice de refracción *n* se denomina dirección rápida. Generalmente, sólo se indica la dirección privile-



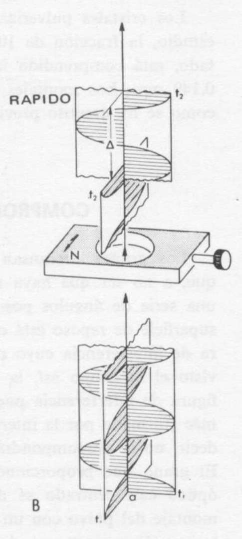




FIGURA 8-1

**(A) Cuña de cuarzo insertada, con su extremo más delgado delante, en la hendidura para los compensadores del microscopio. Hacia su extremo más grueso, el retardo producido por la cuña de cuarzo aumenta alrededor de 1700 m$\mu$ para algunos o alrededor de 2800 m$\mu$ para otros. (B) El compensador que intercepta las dos ondas luminosas polarizadas perpendicularmente, se supone que, no interfiere. Después de pasar a través de la placa, la onda que vibraba paralela a la dirección N de la placa (flecha de cabeza doble) está, en el tiempo $t_2$, a una distancia $\Delta$ por detrás de la otra. Si la placa del compensador es roja de primer orden (yeso), $\Delta$ es aproximadamente de 550 m$\mu$. Si es una placa de 1/4 $\lambda$ (mica), $\Delta$ es aproximadamente de 150 m$\mu$. La flecha de cabeza doble que indica la dirección lenta o N, viene algunas veces marcada con Z o $\gamma$ por los fabricantes.**

giada $N$ en la montura metálica del accesorio (con una línea o flechas grabadas). Las ondas luminosas que vibran paralelas a esta dirección $N$ mientras pasan a través de la placa accesoria, se propagan más despacio que las que vibran paralelamente a la dirección $n$, no marcada, durante su transmisión. Por consiguiente, después de la emergencia procedente del accesorio, la onda lenta presenta un retardo con respecto a la onda rápida (véase fig. 7-3).

Si se inserta gradualmente una cuña de cuarzo con su extremo delgado primero en la abertura accesoria (fig. 8-1A), produce un aumento creciente de los retardos a medida que sus porciones más gruesas se colocan en el camino de la luz. Por otra parte, la placa de yeso rojo de primer orden es de espesor constante. Su birrefringencia ($N$-$n$) y espesor son tales que producen un retardo ($\Delta$) de 550 m$\mu$. Considérense, por ejemplo, dos ondas perpendiculares entre sí, precisamente en fase en el tiempo $t_1$ en la figura 8-1B (su interacción mutua se ha ignorado aquí). Después de atravesar la placa, ya no siguen estando en fase. La vibración en el tiempo $t_2$ para la onda que se propagó más despacio a través de la placa, queda precisamente a 550 m$\mu$ por detrás de la vibración de la onda más rápida en el mismo tiempo.

La lámina de mica de un cuarto de onda es generalmente una placa delgada de mica de suficiente espesor y birrefringencia ($N$-$n$) para producir un retardo ($\Delta$) de unas 150 m$\mu$ (aproximadamente un cuarto de la longitud de onda de la luz de sodio). Así, si dos ondas perpendiculares entre sí están en fase antes de atravesar la placa, la onda que se desplaza más despacio sufre un retardo al atravesar la lámina de mica de aproximadamente 150 m$\mu$ con respecto a la onda rápida.

## Adición

Supóngase que un cristal anisótropo, visto a 45° de la posición de extinción y entre nicoles cruzados, presente un color de retardo gris de primer orden ($\Delta = 100$ m$\mu$). La inserción de una lámina de yeso de forma que su dirección $N$ sea paralela a la del cristal (fig. 8-2A), cambia el color del retardo observado a un azul de segundo orden ($\Delta = 650$ m$\mu$). Cuando la inserción de un accesorio hace subir el orden de un color de interferencia, por un incremento comparable al valor del retardo del accesorio, el proceso se denomina *adición*. La explicación es como sigue (fig. 8-2A): después de salir del cristal, la onda que vibró paralela a $N_c$ en el cristal está 100 m$\mu$ por detrás de la que vibró paralela a $n_c$. Al penetrar en la lámina de yeso, esta onda que presenta ya un retardo, puesto que vibra paralela a $N$ mientras está en la placa de yeso, queda afectada por un retardo adicional de 550 m$\mu$, quedando finalmente 650 m$\mu$ por detrás del rayo rápido. Por tanto, si se observa entre nicoles cruzados, se apreciará un color de interferencia correspondiente a 650 m$\mu$ (es decir un azul de segundo orden).

## Sustracción

Supóngase que el cristal ha girado 90° de forma que $N$ y $n$, sus direcciones privilegiadas, han cambiado sus situaciones (fig. 8-2B). La onda que presentaba retardo, y que vibraba dentro del cristal paralela a $N_c$, dirección lenta del cristal, estará como antes 100 m$\mu$ por detrás de la onda rápida des-

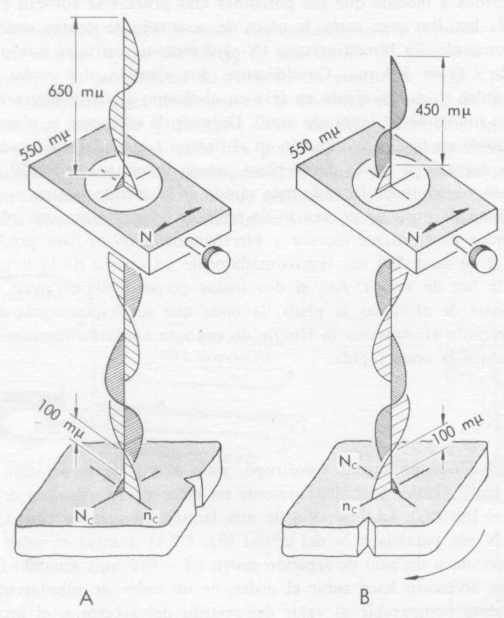



FIGURA 8-2

**Cristal de retardo de 100 m$\mu$ a 45° de la extinción en posición aditiva (A) y posición sustractiva (B) con respecto al compensador rojo de primer orden (550 m$\mu$). Nótese, que la onda rayada fina, que se propaga más lentamente en el cristal, es retardada más tarde por la placa de yeso en (A). En (B) la onda que atraviesa más de prisa (rayado grueso) queda retardada por la placa de yeso de forma que la anterior onda lenta la ha alcanzado y pasado a 450 m$\mu$.**

pués de salir del cristal. Ahora, sin embargo, cuando penetra en la lámina de yeso, esta onda anteriormente lenta vibra paralela a la dirección rápida mientras que la onda que antes era la rápida vibra ahora paralela a la dirección lenta de la lámina de yeso. Por consiguiente, aunque la onda de rayado

grueso (fig. 8-2B) estuviera 100 m$\mu$ por delante antes de penetrar en la lámina de yeso, la onda de rayado fino gana 550 m$\mu$ para igualar y sobrepasarla mientras se desplaza dentro de la lámina de yeso. Así, la onda finalmente rayada, al salir de la lámina de yeso, lleva un adelanto de 450 m$\mu$ (550 m$\mu$ — 100 m$\mu$). El color de retardo correspondiente a 450 m$\mu$ —es decir, el naranja de primer orden— es el que se observará. Tal proceso, producido porque la onda rápida dentro del cristal se transforma en la onda lenta dentro de la lámina de yeso, se denomina *sustracción;* el retardo resultante es igual a la diferencia entre los dos valores individuales del retardo de las dos láminas tratadas.

### Reglas generales

La adición aparece cuando las direcciones *N* del cristal y de la placa compensadora son coincidentes. La sustracción se da cuando las direcciones *N* del cristal y del compensador forman ángulo recto. Dicho de otra forma, si hay adición, entonces *N* del cristal y del compensador deben estar paralelas o casi paralelas. Si hay sustracción, deben ser perpendiculares o casi perpendiculares entre sí.

Si después de la inserción de una lámina roja de primer orden o de un cuarto de $\lambda$ —o durante la inserción de una cuña de cuarzo (primero el extremo delgado)— los colores de interferencia de orden más alto sustituyen a los de orden más bajo, ha habido adición. Si los colores de orden más bajo desplazan a los de orden más alto, ha habido sustracción.

## DETERMINACIÓN DEL SIGNO ÓPTICO

### Principios implicados

Las direcciones de vibración de los rayos *E* y *O* que emergen del cristal en puntos comunes del campo de visión, una vez proyectadas ortográficamente, se han dibujado en la figura 8-3 tanto para figuras de interferencia uniáxica positiva ( + ) como negativa ( — ). Por definición, $\epsilon'$ es superior a $\omega$ en los cristales ( + ) pero es menor que $\omega$ en los cristales ( — ). Por eso, en la figura 8-3, donde se han presentado esquemáticamente los valores relativos de $\epsilon'$ y $\omega$ de estos rayos según la longitud de las líneas que indican sus direcciones de vibración, la vibración radial del rayo *E* —es decir, la vibración que «sale» del melatopo—, es menor que la vibración del rayo *O* para el cristal ( + ), pero es más corta para el cristal ( — ). Por consiguiente, la inserción de un accesorio con su dirección *N* tal como marca la figura 8-3, produce sustracción en los cuadrantes situados al NO y SE del melatopo en los cristales ( + ), o al NE y SO en los cristales ( — ). En los restantes cuadrantes hay adición. Las reglas usuales para la determinación del signo óp-

tico son: 1) si la línea que une los cuadrantes donde hay sustracción (de trazos en la figura 8-3) es perpendicular a la dirección *N* de la placa accesoria —es decir, que forma un signo más, imaginario— el cristal es de signo óptico ( + ), y 2) si esta línea es paralela —formando un signo menos, imaginario— el cristal es de signo óptico ( — ).

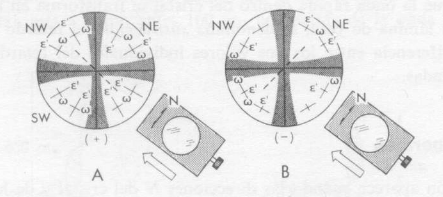



FIGURA 8-3

**Relación angular de las direcciones N del compensador y las vibraciones N y n (respectivamente representadas como líneas largas y cortas) de los rayos que emergen dentro de los cuatro cuadrantes en los cuales la cruz uniáxica divide la figura de interferencia. Estos cuadrantes están marcados con las direcciones de la brújula que aquí se emplean para referirse a ellos. En (A) el cristal es positivo ($N = \epsilon'$, $n = \omega$); en (B) es negativo ($N = \omega$; $n = \epsilon'$). Con intención ilustrativa, los dos cuadrantes en los cuales hay sustracción después de insertar el compensador, están unidos por una línea de trazos.**

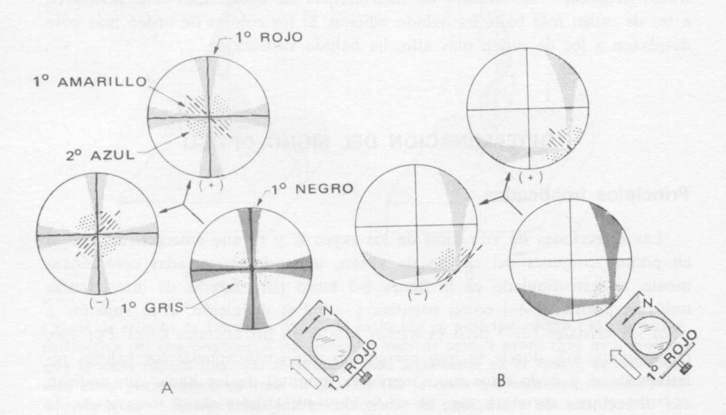



FIGURA 8-4

**Determinación del signo óptico a partir de la disposición de los colores de interferencia después de la inserción de la placa roja de primer orden (yeso). Nótese que los resultados son similares, esté bien centrado el eje óptico (A) o no (B). La línea gruesa de trazos que une los cuadrantes en los cuales hay sustracción —es decir los que contienen el amarillo de 1.er orden— ha sido añadida con el propósito de ilustrar.**

El signo óptico puede calcularse, entonces, localizando los cuadrantes en los cuales se dé la sustracción después de la inserción de un accesorio cuya dirección $N$ sea conocida. Para figuras de interferencia en las que aparezcan pocas isocromas, la placa de (yeso) rojo de primer orden, o la de un cuarto de onda de mica sirven de igual manera para la determinación del signo óptico. Si la placa roja de primer orden ($\Delta = 550$ m$\mu$) se inserta, las áreas de gris 1.º ($\Delta = 125$ m$\mu$) adyacentes al melatopo se vuelven amarillas 1.º

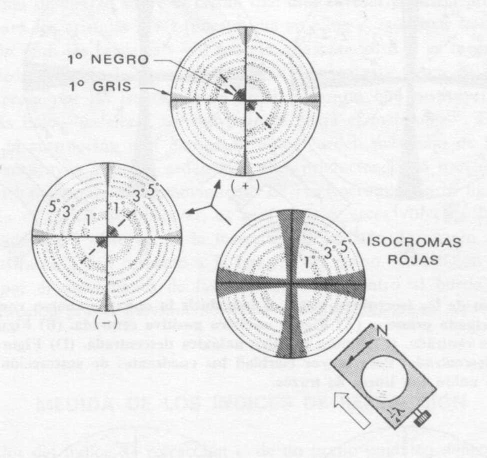



FIGURA 8-5

**Determinación del signo óptico a partir de la disposición de los dos puntos negros producidos por la inserción de la placa de mica de 1/4 λ. Los dos puntos negros marcan los cuadrantes en los que hay sustracción. Para mayor claridad una línea de trazos gruesa une los cuadrantes donde se da la sustracción.**

($\Delta = 425$ m$\mu$; es decir, 125 — 550 m$\mu$) en los cuadrantes de sustracción, pero azules 2.º ($\Delta = 675$ m$\mu$; es decir, 125 + 550 m$\mu$) en las regiones de adición. Si se observa la figura de interferencia después de la inserción de la placa de mica de un cuarto de onda ($\Delta = 150$ m$\mu$), las mismas áreas grises 1.º se transforman en negro 1.º ($\Delta = 25$ m$\mu$, es decir 125 — 150 m$\mu$) en los cuadrantes de sustracción y en blanco 1.º ($\Delta = 275$ m$\mu$; es decir 125 + 150 m$\mu$) en los cuadrantes donde hay adición. Por consiguiente, el amarillo 1.º en lados opuestos del melatopo (fig. 8-4) marca los cuadrantes de sustracción si se inserta una placa roja de primer orden. Si se coloca una placa de mica de un cuarto de onda, dos puntos negros (fig. 8-5) marcan los cuadrantes de sustracción. Así, siguiendo las reglas de los anteriores párrafos, si la línea que une los centros de estas dos áreas amarillas o puntos negros es perpendicular a la dirección $N$ del compensador insertado, el cristal es de signo óptico ( + ). Si es paralelo, el cristal es de signo óptico ( — ).

Para figuras de interferencia que presentan isocromas numerosas y muy juntas, la cuña de cuarzo tiene ciertas ventajas en la determinación del signo óptico, particularmente para figuras no centradas, en las cuales el melatopo no aparece en el campo de visión. Observadas mientras se introduce la cuña

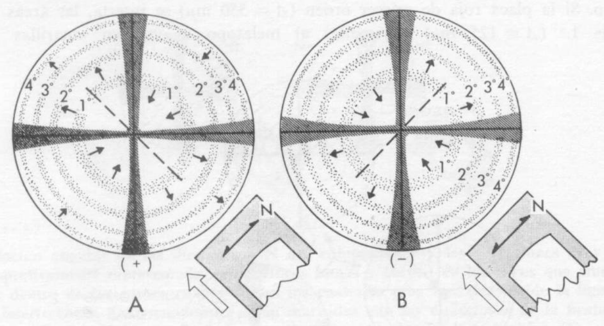
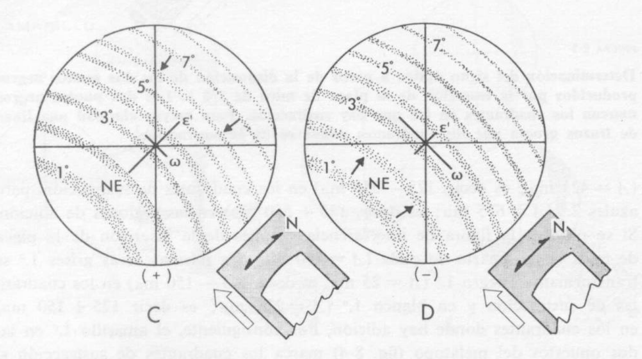



FIGURA 8-6

**Movimiento de las isocromas, vistas al introducir la cuña de cuarzo con su extremo más delgado primero. (A) Figura uniáxica positiva centrada. (B) Figura uniáxica negativa centrada. (C) Figura positiva uniáxica descentrada. (D) Figura negativa uniáxica descentrada. Para mayor claridad los cuadrantes de sustracción en (A) y (B) se han unido con líneas de trazos.**




de cuarzo por su extremo más delgado, las isocromas se desplazan hacia fuera del melatopo en los cuadrantes de sustracción (fig. 8-6) y hacia el melatopo en los cuadrantes de adición. Si la bisectriz de los cuadrantes de sustracción en los lados opuestos del melatopo es perpendicular a la dirección *N* de la cuña, el cristal es de signo ( + ) (fig. 8-6A); en el caso contrario (figura 8-6B) es ( — ).

Para determinar el signo óptico de las figuras de interferencia no centradas se necesita determinar si $\epsilon'$ es superior a $\omega$ o no. Para hacer esto, gírese primero la platina hasta que una línea que una el melatopo con la intersección del retículo sea aproximadamente paralela a la dirección *N*, de cualquier compensador que se haya insertado. El cristal está ahora orientado con su dirección privilegiada $\epsilon'$, paralela a (y con su dirección privilegiada $\omega$ perpendicular a) la dirección *N* del compensador (fig. 8-6C, D). La inserción de una cuña de cuarzo sobre el cristal que está en esta posición produce una adición para los cristales ( + ) (puesto que en ellos $\epsilon'$ es mayor que $\omega$) y una sustracción para los cristales ( — ) (puesto que para ellos $\epsilon'$ es menor que $\omega$). Como puede verse en la figura 8-6C, la adición en esta figura de interferencia se expresa por las isocromas de orden más alto que sustituyen a las de orden más bajo —es decir, un movimiento hacia el melatopo—. En la figura 8-6D, la sustracción está expresada por el orden más bajo de las isocromas que sustituyen a las de orden más alto, produciendo un movimiento que se aleja del melatopo. Si el movimiento de las isocromas de la figura de interferencia es difícil de observar, es preferible a veces volver a la observación ortoscópica y observar si la inserción de la cuña de cuarzo causa adición o sustracción con respecto a la imagen del grano. La adición queda expresada por el movimiento de las isocromas del centro al borde del grano y la sustracción por el movimiento hacia el centro del grano (véase fig. 8-9).

## MEDIDA DE LOS ÍNDICES DE REFRACCIÓN

El valor del índice de refracción $\epsilon'$ de un grano uniáxico depende del ángulo que se forma entre su eje óptico y el plano de la sección del cristal en la que descansa. La figura 8-7 ilustra la variación de $\epsilon'$ y el color del retardo de cuatro granos de espesor aproximadamente igual de un cristal uniáxico ( + ) dado; las direcciones privilegiadas se han dibujado con longitudes proporcionales a los valores de $\epsilon'$ y de $\omega$ del grano. Para el grano *b*, cuyo eje óptico es casi perpendicular a la sección, $\epsilon'$ es casi del mismo valor que $\omega$, un hecho que se comprueba por su bajo color de birrefringencia. El eje óptico en los granos *c* y *d* es cada vez más paralelo a la sección; por consiguiente $\epsilon'$ se hace cada vez más semejante a $\epsilon$ y como resultado los colores de birrefringencia son cada vez más altos si pasamos del grano *a* al *d*. En el grano *d*, el eje óptico es paralelo a la sección; como consecuencia $\epsilon'$ es igual que $\epsilon$ y el grano *d* posee por tanto el color de birrefringencia más elevado de todos los granos (puesto que su birrefringencia para esta posición se hace igual a ($\epsilon - \omega$) que es el máximo posible).

En una preparación de material pulverizado dada hay generalmente una gran multitud de granos tales como *b* y *c*; la medida de $\epsilon'$ para ellos no tiene un interés particular. Se hace excepción en el caso como el de los carbonatos romboédricos, donde una exfoliación romboédrica (10$\bar{1}$1) condiciona de forma casi única el plano sobre el que el grano descansa. Ya que tanto

en unas monturas como en otras los granos van a quedar colocados en ese plano de exfoliación determinado, el índice $\epsilon'$ para tales granos (representado como $\epsilon'_{10\bar{1}1}$) puede medirse y proporcionar información acerca de qué carbonato romboédrico se trata.

Los índices $\epsilon$ y $\omega$, al contrario que $\epsilon'$, son siempre valores definidos cuya determinación puede ayudar a la identificación del mineral. Su determinación, por tanto, se tratará con detalle.

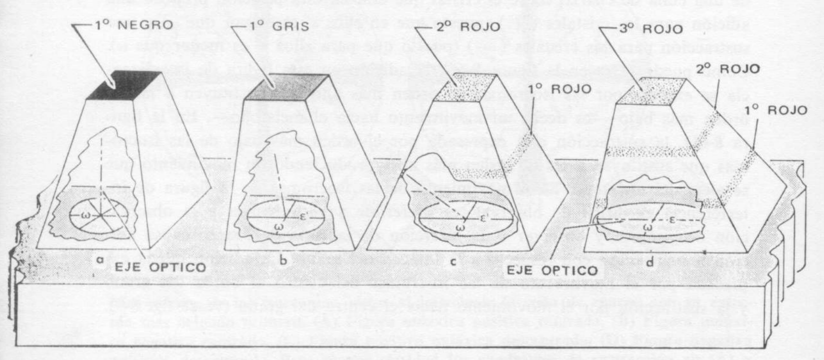


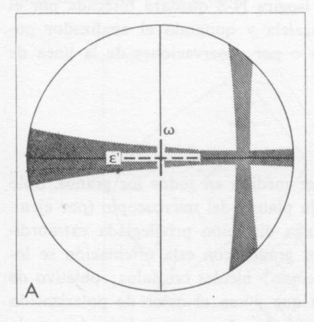

FIGURA 8-7

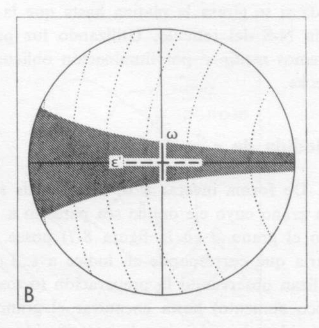
**Relación entre la orientación del eje óptico (línea de trazos y puntos) y el color de interferencia para cuatro granos de igual espesor. Nótese que, al hacerse el eje óptico cada vez más paralelo a la sección del cristal (desde los granos a a de) $\epsilon'$ se acerca en valor a $\epsilon$ y el retardo alcanza su orden máximo para este espesor. Sólo las isocromas rojas (punteadas) y el negro y gris de primer orden han sido representadas.**

## Medida de ω

Una de las dos direcciones privilegiadas de un grano uniáxico corresponde a $\omega$ (por ejemplo, en los granos *a* y *d* de la figura 8-7). Así, cualquier grano puede seleccionarse para la medida de $\omega$; por tanto uno de los colores de interferencia relativamente bajo (por ejemplo grano *a* o *b*) proporcionará una figura de interferencia más fácil de interpretar. Gírese la platina del microscopio hasta que una isogira de la figura de interferencia quede bisecada por el hilo E-O del retículo, tal como se ve en la figura 8-8A o B. Con el objeto de ilustrar mejor, en cada figura, las direcciones privilegiadas que están asociadas con el rayo central del cono de iluminación, se ven en el punto de emergencia del rayo, en la intersección del retículo. La trayectoria de este rayo central, y por tanto sus direcciones privilegiadas asociadas dentro del cristal, coinciden en dirección con aquellas de todos los rayos que atraviesan el cristal después de poner el microscopio en posición ortoscópica

(véase fig. 7-10). De esta manera el centro de la figura de interferencia revela a la vez la dirección y la identidad (es decir si es ε′ o ω) de las direcciones privilegiadas que poseen los granos que se examinen ortoscópicamente (figura 8-8C).



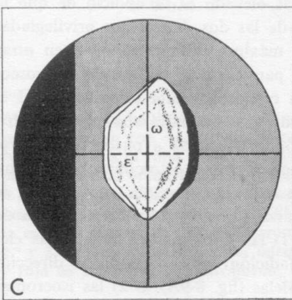




FIGURA 8-8

**(A y B) Orientaciones conoscópicas correctas de los granos de forma que su dirección privilegiada ω esté orientada N-S. (C) Úsese iluminación oblicua para comprobar el valor de ω del grano que se orientó conoscópicamente en (A) o (B) comparado con el índice del aceite de inmersión. Suponiendo un polarizador N-S, nótese que sólo los rayos ordinarios O, para los cuales el índice del cristal es ω, pueden ser transmitidos por el cristal si éste está iluminado ortoscópicamente, tal como en (C). Puesto que los rayos extraordinarios, E, no se transmiten en esta orientación la dirección privilegiada ε′ se ha marcado con una línea de trazos.**

Los granos uniáxicos orientados como en la figura 8-8C transmiten sólo rayos *O* (si la dirección del polarizador es N-S). La dirección privilegiada ε′ del grano ha sido dibujada, por tanto, como una línea de trazos, puesto que el grano no transmite, cuando está en esta orientación, luz que vibre paralela a esta dirección. Así, ω es el único índice que presenta el grano en esta orientación. Su valor puede medirse, después de quitar el analizador y convertir el ortoscopio, por cualquier método de iluminación oblicua o de la línea de Becke, de la misma forma que *n* en los granos isótropos.

## Medida de ε′

En ocasiones, como se ha explicado previamente, puede ser necesaria la medida de ε′. Los granos de la figura 8-8 estarían colocados para esta medida si se girara la platina hasta que la isogira N-S quedara bisecada por el hilo N-S del retículo. Utilizando luz paralela y quitando el analizador podremos medir ε′ por iluminación oblicua o por observaciones de la línea de Becke.

## Medida de ε

De forma inversa a ω, ε no puede ser medido en todos los granos. Sólo un grano cuyo eje óptico sea paralelo a la platina del microscopio (por ejemplo el grano *d* en la figura 8-7) posee una dirección privilegiada extraordinaria que corresponde en índice a ε. Los granos con esta orientación se localizan observando la preparación (ortoscopio; nicoles cruzados; objetivo de poco aumento) hasta encontrar el grano que posea el color de polarización más elevado. El color de polarización más elevado es un indicio de que la diferencia entre los índices de refracción de las dos direcciones privilegiadas del grano es igual (o muy semejante) al máximo posible ($\epsilon - \omega$); en otras palabras, su eje óptico es paralelo o casi paralelo a la platina del microscopio. La figura de interferencia sirve para comprobar esta orientación; si el grano está debidamente orientado para medir ε, se obtendrá una figura «flash».

Una vez elegido el grano, su dirección privilegiada ε puede distinguirse de su dirección ω. Esto se hace observando el grano ortoscópicamente entre nicoles cruzados a 45° de la posición de extinción, durante la inserción de una lámina de yeso o de una cuña de cuarzo (fig. 8-9). Usando una cuña de cuarzo pueden existir dos posibilidades: 1) las isocromas de orden más elevado desplazan a las de orden más bajo (adición) indicando que las direcciones *N* del accesorio y del grano son paralelas (fig. 8-9A), o 2) las isocromas de orden más bajo desplazan a las de orden más alto (sustracción) indicando que la dirección *N* del accesorio es paralela a la dirección *n* del grano (figura 8-9B). En cualquier caso, el observador, puesto que conoce la dirección *N* del accesorio, descubre de igual forma la dirección *N* del cristal. Por tanto, por definición, $\omega > \epsilon' > \epsilon$ en los cristales uniáxicos (—) mientras que $\epsilon > \epsilon' > \omega$ en los uniáxicos (+). Así, si el observador conoce el signo óptico del grano que está observando conoce cuando la dirección ε coincide con la dirección *N* (como ocurre en un cristal uniáxico positivo) o con la dirección *n* (en un cristal uniáxico negativo). Una vez identificada la dirección ε, se gira la platina del microscopio hasta que la dirección ε quede N-S y en extinción, y se saca por completo el accesorio. El analizador se quita también, y el grano queda en posición para medir ε por los métodos usuales.

Si el signo óptico del grano no ha sido determinado previamente, la dirección de vibración ε puede determinarse a veces a partir de la figura «flash»

a 45° de la posición de extinción. Como ya se vio anteriormente (véase página 141) los colores de interferencia en las figuras «flash» decrecen hacia fuera partiendo del centro hacia los cuadrantes bisecados por el eje óptico, y por tanto por la dirección de vibración $\epsilon$. Una vez localizada, puede girarse la dirección de vibración $\epsilon$ hasta que quede N-S para permitir la medida del índice $\epsilon$ del grano.

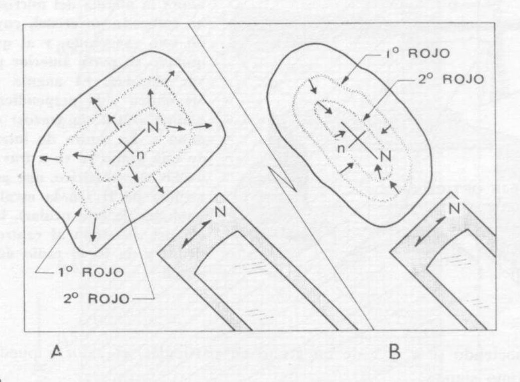



FIGURA 8-9

**Movimiento de las isocromas (sólo se han representado las rojas) al introducir la cuña de cuarzo con su extremo delgado primero. (A) En un grano cuya dirección N es paralela a la cuña. Aquí se da la adición y las isocromas de orden mayor desplazan a las de orden menor. (B) En un grano cuya dirección N es perpendicular a la cuña. En este caso las isocromas de orden más bajo desplazan a las de orden más alto, es decir hay sustracción. Si se introduce una lámina de yeso en lugar de la cuña de cuarzo, en (A) las isocromas rojas de 1.° y 2.° orden se harán rojas de 2.° y 3.er orden respectivamente; mientras que en (B) se hacían negro de 1.er orden y rojo de 1.er orden respectivamente.**

## Medida indirecta de $\epsilon$

Cuando una exfoliación dominante disminuye sobremanera la posibilidad de que existan fracturas paralelas al eje óptico del cristal, la medida directa de $\epsilon$ se hace extremadamente difícil. Sin embargo es posible calcular $\epsilon$ a partir de una medida de $\epsilon'$ a condición de que: 1) el valor de $\omega$ sea conocido, y 2) que pueda medirse el ángulo que forman el eje óptico y la normal a la platina, según la figura de interferencia. El valor de $\omega$ se determina por métodos de inmersión y, afortunadamente, el ángulo en cuestión que se ha denominado $\nu$ en la figura 8-10 puede medirse con rapidez adaptando el método descrito por Tobi (1956, pág. 516).

Para determinar $\nu$ a partir de la figura de interferencia del grano del que quiere medirse $\epsilon$, determínese *R* y *D* (véase fig. 8-10) según unidades del mi-

crómetro del ocular. Los valores de $D/R$ y de $\omega$ para el cristal, son las coordinadas de un punto en una línea diagonal en la figura 8-11 que indica el valor de $\nu$ [1].

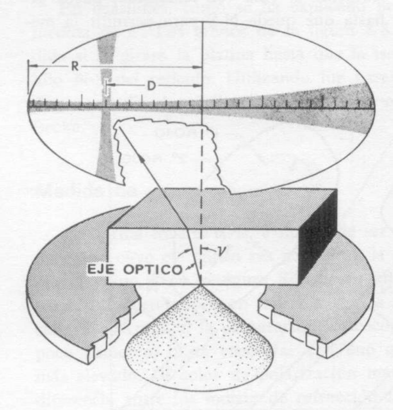



FIGURA 8-10

**Sobre la platina del microscopio se ha colocado un cristal, cuyo tamaño está exagerado, y al que se ha quitado su parte anterior para mayor claridad. El ángulo entre su eje óptico y la perpendicular a la platina (línea de trazos) se denomina $\nu$. La figura de interferencia de este grano se ve a través de un ocular micrométrico, que permite la medida de D (en la escala de las unidades de este ocular), la distancia del melatopo al centro del retículo y de R, el radio del campo visual.**

Conociendo $\omega$, $\epsilon'$ y $\nu$ de un grano en particular, el valor $\epsilon$ puede calcularse como sigue:

$$\epsilon^2 = \frac{\epsilon'^2(\omega^2 \operatorname{sen}^2 \nu)}{\omega^2 - (\epsilon'^2 \cos^2 \nu)} \qquad \text{(Ec. 8-1)}$$

Los cálculos son pesados pero, afortunadamente, puede llegarse a una solución rápida y exacta con la adaptación de un gráfico diseñado por Mertie (figura 8-12). Un ejemplo explica mejor su uso. Para un mineral ( + ) dado, supóngase $\omega = 1{,}550$, $\epsilon' = 1{,}600$ y para el grano en el que $\epsilon'$ se ha determinado, $\nu =$ a 85°. En la figura 8-12 colocar $\omega$ en la escala de la izquierda, y el punto cuyas coordinadas son $\epsilon'$ y $\nu$ en la escala del interior; nótese que la escala más baja es la que se emplea para $\nu$. Una línea que una estos dos puntos corta a la escala $\epsilon$ en el valor de $\epsilon$ del mineral en cuestión, es decir, alrededor de 1,720 para este ejemplo. Calculado matemáticamente a partir de la ecuación 8-1 el valor es 1,719.

La figura 8-12 puede usarse para determinar $\epsilon$, aun cuando $\epsilon'$ se haya medido en un grano cuyo melatopo cae fuera del campo de visión. En este caso el valor de $\nu$ puede determinarse como sigue: 1) gírese la platina del microscopio hasta que los dos extremos opuestos de un brazo de la isogira toquen sucesivamente el extremo de un hilo del retículo (fig. 8-13A y B). Anótese la medida de estas dos posiciones angulares de la platina y anotar su valor como

(1) El objetivo usado para obtener la figura de interferencia puede tener una abertura numérica de 0,85 para dar valores correctos en la figura 8-11. Para una abertura numérica diferente (A′) multiplíquense las razones $D/R$ observadas por A′/0,85 a fin de corregirlas para su uso en la figura 8-11.

$S_1$. 2) Repítase este proceso para el otro brazo de la isogira sirviendo de referencia el mismo extremo del hilo del retículo que se usó anteriormente (figura 8-13C y D). Anótese la medida de estas dos posiciones como $S_2$. 3) Sea

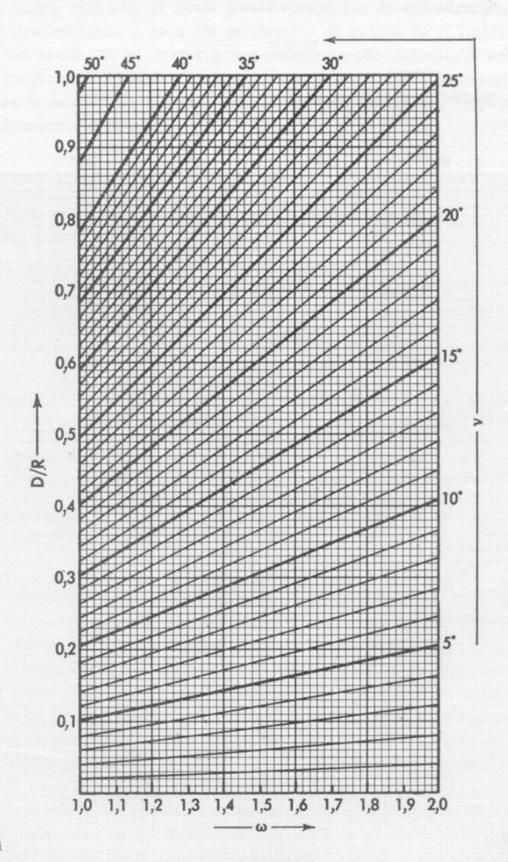



FIGURA 8-11

**Diagrama para la determinación de $\nu$, el ángulo que forma el eje óptico con la normal a la platina, una vez conocidos $\omega$ y D/R. (Adaptada de Tobi 1956.)**

$\psi$ igual al ángulo más pequeño de ambas posiciones $S_1$ y $S_2$. 4) El valor de $\nu$ puede determinarse ahora por el punto que representa el $\psi$ del grano y los valores $\omega$ en la figura 8-14A.

La figura 8-14A sólo se puede aplicar a figuras de interferencia obtenidas con un objetivo cuya abertura numérica sea 0,85. Se pueden construir diagramas similares para objetivos de diferente abertura numérica según la siguiente ecuación

$$\operatorname{tg} v = \frac{\operatorname{tg} u'}{\cos \psi/2} \qquad \text{(Ec. 8-2)}$$

donde $u'$ representa el arco seno N. A./ω.

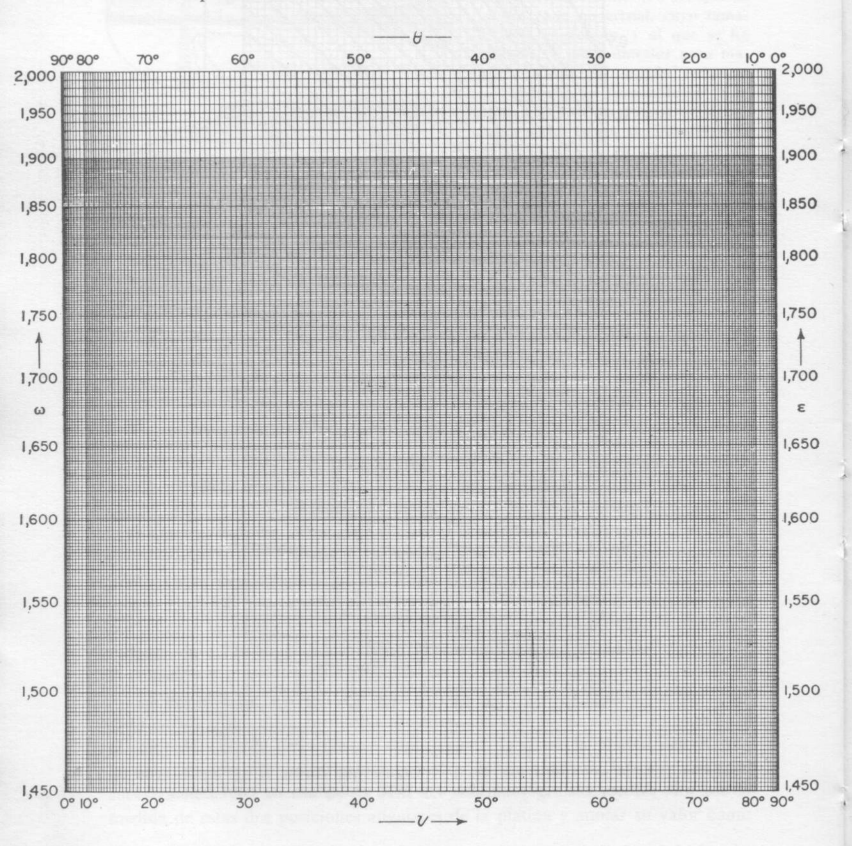



FIGURA 8-12

**Diagrama para la solución rápida de la ecuación 8-1, o de las ecuaciones 6-3 y 6-4. Adaptación del diagrama para la determinación de 2V según Mertie (1942, pág. 542).**

Debe tenerse en cuenta en la figura 8-14A, que no pueden ser calculados valores de $\psi$ mayores de 140°. Esto se debe principalmente a que la exactitud con que se determina $\nu$ para estos valores tan altos de $\psi$ baja considerablemente. Como ejercicio, el lector puede comprobar la exactitud de la figura 8-14A determinando $\nu$ para un romboedro de calcita ($\omega$ = 1,658) en una montura de aceite. Si el grano está verdaderamente reposando sobre una cara del romboedro, $\nu$ puede considerarse como 44,5° ± 3°. Se necesita tener cuidado en la medida de $\psi$ puesto que el extremo de algunas isogiras puede ser completamente difuso.

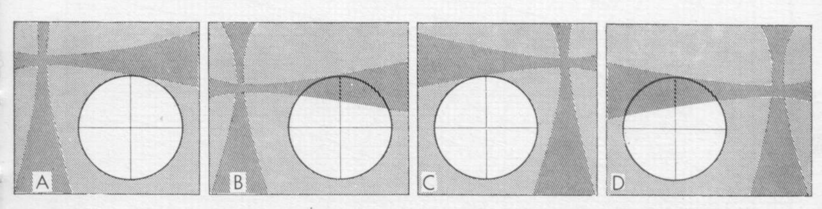



FIGURA 8-13

**Determinación del valor del ángulo $\psi$ para una figura no centrada, en la cual el el melatopo emerge por fuera del campo de visión. La platina se gira hasta que la figura de interferencia se asemeje a (A), y entonces a (B). La media de las lecturas en la platina para ambas posiciones es la posición de la platina para la cual la línea central de la isogira E-O estará tangente con el extremo norte del campo de visión. La media de las posiciones (C) y (D) es la posición de la platina para la cual la línea central de la isogira E-O, está de nuevo tangente al extremo N del campo. La pequeña diferencia entre ambas posiciones medias en el ángulo $\psi$.**

Un ejemplo ilustra la conveniencia del método completo. Para un polvo desconocido se determina que $\omega$ es 1,679 y el signo óptico (—). En una montura con aceite la exfoliación dominante impide a los granos el presentar otras superficies. En ausencia de granos orientados con sus ejes ópticos paralelos al plano de la platina (en los cuales $\epsilon$ puede ser medido directamente), se usan las técnicas normales de los métodos de inmersión y se encuentra que el índice $\epsilon'$ de varios fragmentos de exfoliación es 1,588. A partir de la figura de interferencia del mismo grano, se emplea el método mostrado en la figura 8-13, cuatro veces (una para cada uno de los extremos de los hilos del retículo), teniendo cuidado de no mover el grano o la preparación. La media de los cuatro valores de $\psi$ así obtenidos es 105°. A partir de este valor y del de $\omega$, $\nu$ determinado en la figura 8-14A es 44°. Ahora, a partir de estos valores [$\omega$ = 1,679, $\epsilon'$ = 1,588, $\nu$ = 44°, signo óptico (—)], $\epsilon$ se determina en la figura 8-12 siendo aproximadamente 1,505. De estos índices se deduce que el mineral puede ser identificado como dolomita ($\omega$ = 1,679, $\epsilon$ = 1,502).

La exactitud de la determinación de $\epsilon$ con el método anterior, depende de: 1) la exactitud de la medida de $\epsilon'$; 2) el valor de $\nu$ y la exactitud de su medida, y 3) del valor $\varepsilon/\omega$ del mineral. Suponiendo que $\epsilon'$ se ha medido con

FIGURA 8-14 A

**Diagrama para la determinación de $\nu$, el ángulo que forma el eje óptico con la normal a la platina, conocidos $\omega$ y $\psi$.**

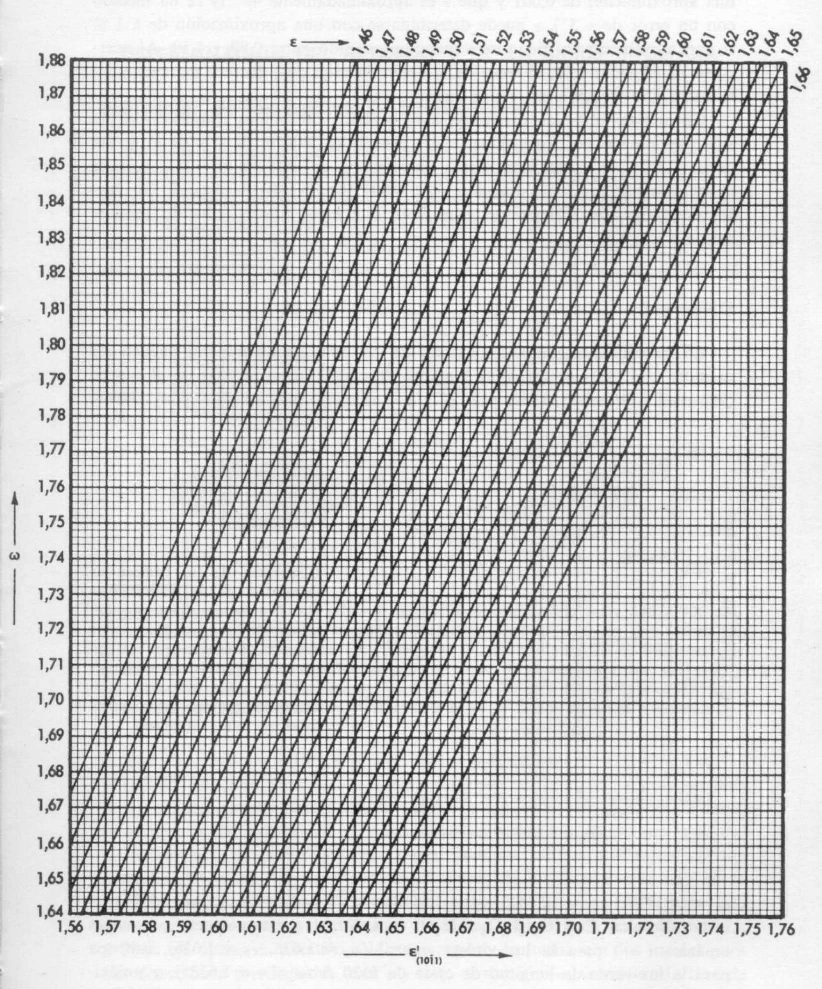



FIGURA 8-14 B

**Diagrama para la determinación de $\epsilon$ en los carbonatos romboédricos, conocida** $\omega$ **y** $\epsilon'_{(10\bar{1}1)}$ (según Loupekine, 1947).

una aproximación de 0,001 y que $\nu$ es aproximadamente 45° (y se ha medido con un error de ± 3°), $\epsilon$ puede determinarse con una aproximación de ± 1 % si para el mineral $\varepsilon/\omega$ tiene un valor comprendido entre 0,89 y 1,10. Al acercarse $\epsilon/\omega$ al valor 1,00, el error de la determinación de $\epsilon$ decrece marcadamente hacia una fracción del 1 por ciento.

Un método utilizado exclusivamente para los carbonatos romboédricos ha sido introducido por Loupekine (1947). En él, los valores de $\omega$ y de $\epsilon'_{10\bar{1}1}$ (es decir $\epsilon'$ para un cristal que reposa en el plano de exfoliación 1011) permite calcular $\epsilon$ con una aproximación de ± 0,004 (fig. 8-14B). Utilizando un factor de corrección (Loupekine, pág. 504), este error queda reducido teóricamente a ± 0,001.

## Dispersión

En trabajos avanzados, los valores de $\epsilon$ y de $\omega$ de un mineral pueden ser medidos con luces de diferente longitud de onda. Tales medidas en el cuarzo (Winchell y Winchell, 1951, pág. 247), por ejemplo, indican que $\omega_F = 1{,}54968$,

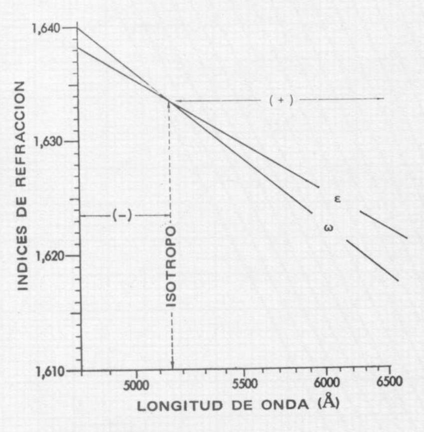



FIGURA 8-15

**Dispersión de los índices de refracción de la metatorbernita. Nótese que, para una determinada longitud de onda, es isótropa, mientras que es ópticamente positiva para longitudes de onda mayores y ópticamente negativa para longitudes de onda menores.**

$\epsilon_F = 1{,}55898$; $\omega_D = 1{,}54425$, $\epsilon_D = 1{,}55336$; y $\omega_C = 1{,}54190$, $\epsilon_C = 1{,}55093$. La metatorbernita, $Cu(UO_2)_2P_2O_8 \cdot 8\,H_2O$, es anormal a este respecto porque es uniáxica (—) para la luz violeta o azul ($\omega_F = 1{,}638$, $\epsilon_F = 1{,}636$), isótropa para la luz verde de longitud de onda de 5120 Å ($\omega = \epsilon = 1{,}6335$), y uniáxica positiva ( + ) para la luz roja ($\omega_C = 1{,}618$, $\epsilon_C = 1{,}622$). La figura 8-15 ilustra gráficamente estas relaciones para la metatorbernita.

# DETERMINACIÓN DEL RETARDO Y DE LA BIRREFRINGENCIA

## Estimación de los colores de interferencia

El valor absoluto de la birrefringencia de un mineral ($\epsilon - \omega$) puede estimarse rápidamente a partir del máximo color de interferencia que se observa entre los granos pequeños de una montura del polvo. Suponiendo que los granos de la montura representan la fracción comprendida entre 100 y 120 mallas de una muestra que ha sido tamizada, todos han pasado a través de aberturas de 0,149 mm, pero no a través de los de 0,125 mm (fig. 8-16). Su

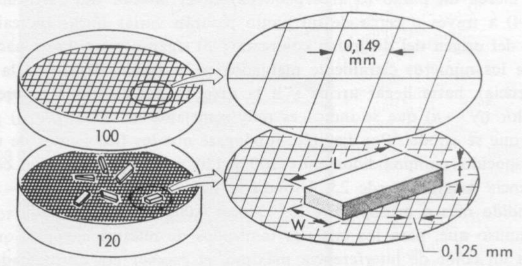



FIGURA 8-16

**Izquierda: la fracción de un mineral machacado comprendida entre 100 y 120 mallas recogida en el tamiz de 120 mallas. Derecha: ampliación de un grano para enseñar su longitud (L), anchura (W) y espesor (t), cuando yace en su posición más estable, es decir, en la superficie de mayor área. Si el tamizado fue enérgico y completo, su anchura debe superar los 0,125 mm; de otra forma habría pasado a través del tamiz de 120 mallas. (Las aperturas de la malla no están a escala.)**

espesor (*t*) y anchura (*W*) son, por tanto, indudablemente menores que las aberturas de 0,149. Suponiendo que el tamizado sea completo (²), la anchura de los granos, al estar colocados en la preparación, excedería de los 0,125 mm; su espesor sería, por tanto, en muchos casos menor que 0,125 mm (particularmente para las laminillas). Por tanto, para los granos más estrechos que presentaran colores de interferencia máximos (de los cientos que hay en la preparación), puede hacerse dos suposiciones: 1) El espesor, (*t*), para este grano se acerca mucho a 0,125 mm (podemos suponer que sea 0,12 mm (³), y 2) su eje óptico es paralelo a la preparación, de forma que los índices para sus direcciones privilegiadas sean $\epsilon$ y $\omega$ (o si son $\epsilon'$ y $\omega$, entonces el valor de

(²) Si no lo fuera, muchos granos muy pequeños capaces de pasar a través de los orificios de 0,125 mm permanecerían en la muestra tamizada.

(³) Si los granos de la montura representan la fracción de 100-200 mallas (como algunos pueden preferir), su espesor mínimo debe de considerarse como 0,07 mm.

$\epsilon'$ debe ser muy cercano a $\epsilon$). Usando la figura 8-17, $\Delta$ puede ser valorado en 100 m$\mu$ por la interpretación del máximo color de interferencia observado. Así, con $\Delta$ conocido y el espesor $t$ aproximadamente conocido según la abertura mínima del tamiz $(\epsilon - \omega)$ puede calcularse fácilmente por una adaptación de la ecuación 7-7, que es

$$(\epsilon - \omega) = \frac{\Delta}{t} \qquad \text{(Ec. 8-3)}$$

La figura 8-17 presenta soluciones gráficas rápidas de la ecuación 8-3 de la forma siguiente: 1) localizando en ella la barra vertical de color que corresponde al máximo color de interferencia observado en los granos; 2) localícese seguidamente la línea horizontal que corresponde al espesor del cristal, $t$; 3) la intersección de la barra vertical de color y la línea horizontal del espesor marca un punto (o área pequeña) en el interior del diagrama coloreado; 4) a través o cerca de un punto pasarán varias líneas radicales que emanan del origen del diagrama coloreado; 5) síganse estas líneas hacia fuera, hasta los números claramente marcados en la escala (*N-n*) (escala de birrefringencia), hasta llegar arriba y a la derecha del diagrama coloreado, y 6) el valor $(N - n)$ que se indica es muy semejante al valor $(\epsilon - \omega)$ para el mineral que se estudia. Por ejemplo, supóngase que los fragmentos de un polvo desconocido, comprendidos entre 100 y 120 mallas presentan un color de interferencia máximo verde 2.º. Usando la figura 8-17, el valor $(\epsilon - \omega)$ está comprendido más o menos entre los valores 0,006 y 0,008.

Se supuso que, para los cristales tamizados de nuestro ejemplo, que presentaban un color de interferencia máximo, el espesor era aproximadamente de 0,12 mm. La figura 8-17 es también especialmente práctica para la determinación de la birrefringencia $(N - n)$ de minerales en secciones delgadas de rocas. Tales secciones, cementadas entre láminas de vidrio para su estudio, son delgadas y generalmente de 0,03 mm de espesor. Así la intersección de la línea de 0,03 mm de espesor con la barra vertical de color de la figura 8-17 que corresponde al máximo color de interferencia observado en la parte delgada del mineral, puede usarse. A veces, sin embargo, las secciones delgadas tienen un espesor diferente de 0,03 mm, bien en toda la sección o en varias áreas; por ejemplo, la sección puede tener forma de cuña. En tales casos el petrógrafo experimentado puede determinar el espesor de las diferentes áreas de la sección observando los colores de interferencia máximos de cualquier grano de cuarzo $(\epsilon - \omega = 0{,}009)$ localmente presentes. Así la intersección de una barra vertical de color (correspondiente al máximo color de interferencia) con la línea radial correspondiente a un valor de $(N - n)$ de 0,009 cae en la línea horizontal correspondiente al espesor de la sección delgada en la figura 8-17.

Los principales minerales que forman las rocas están colocados en la figura 8-17 de acuerdo con su birrefringencia máxima. Los minerales uniáxicos están señalados con una (U), y su birrefringencia corresponde a $(\epsilon - \omega)$. Para completar, los minerales biáxicos se han señalado también con una letra (B). El signo ( + ) o ( — ) que está debajo de U o B indica el signo óptico del

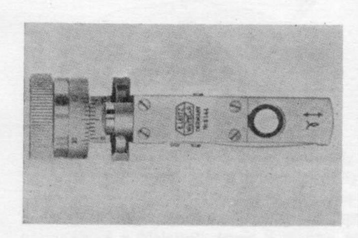
mineral. La birrefringencia ($N - n$) para cristales biáxicos, que se estudiarán en el capítulo 9, corresponde a ($\gamma - \alpha$). Si un mineral está incluido en la lista de la figura 8-17 podrá a veces ser rápidamente identificado con sólo este criterio. Por otra parte, un valor determinado de birrefringencia máxima —por ejemplo 0,010— puede pertenecer a varios minerales diferentes, algunos de los cuales no aparecen en la lista. Por consiguiente si se hace con esta lista una identificación inicial, es aconsejable comprobar su validez con posteriores comparaciones de tantas propiedades ópticas y físicas como sea posible. Libros de referencia tales como el Winchell y Winchell (1951) contienen descripciones completas de los minerales con cuyas propiedades pueden compararse las de los minerales desconocidos.

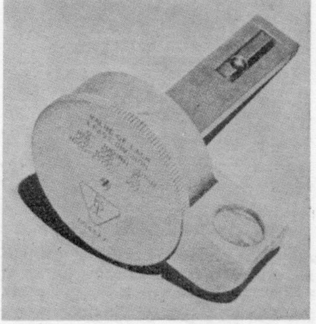
## Medida de precisión

Los retardos superiores a 2700 m$\mu$ pueden medirse cuantitativamente (± 2 por ciento) con un compensador de Berek o con un compensador de rendija (fig. 8-18). El uso del último es conveniente puesto que las lecturas

FIGURA 8-18

**Abajo: Compensador de Berek (por cortesía de E. Leitz, Inc.). Derecha: Compensador de rendija (por cortesía de Bausch y Lomb Optical Company).**





se hacen directamente en milimicras evitando la necesidad de estudiar tablas de conversión. La cuña de cuarzo, relativamente barata, manufacturada por Cooke, Troughton y Sims, permite también hacer medidas exactas de los retardos. Tales medidas de precisión del retardo de una placa de cristal, si están seguidas de una exacta medida de su espesor, permiten calcular con exactitud la birrefringencia conocida (ec. 8-3). Inversamente, para placas de birrefringencia conocida una medida precisa de su retardo permite calcular el espesor.

## ÁNGULOS DE EXTINCIÓN: SIGNO DE ELONGACIÓN

El ángulo entre las direcciones privilegiadas de una placa cristalina y cualquier propiedad cristalográfica linear presente en la placa se denomina su ángulo de extinción. Tales direcciones cristalográficas lineales pueden ser las líneas de intersección de una serie de planos de exfoliación con la placa cristalina —denominadas líneas de exfoliación (fig. 8-19)—, o puede ser el límite recto de la placa cuando termina por una cara del cristal. En ambos casos, el ángulo de extinción puede medirse alineando la dirección cristalográfica observada con una línea del retículo (fig. 8-19A) y anotando la posición angular de la platina del microscopio que está indicada en el índice. La platina debe girarse entonces hasta que la placa del cristal quede extinguida (figura 8-19B) y sus direcciones privilegiadas estén paralelas a los hilos del retículo; la lectura del ángulo de la platina debe anotarse de nuevo. La diferencia entre las lecturas de las posiciones A y B es igual a $T$, el ángulo de extin-

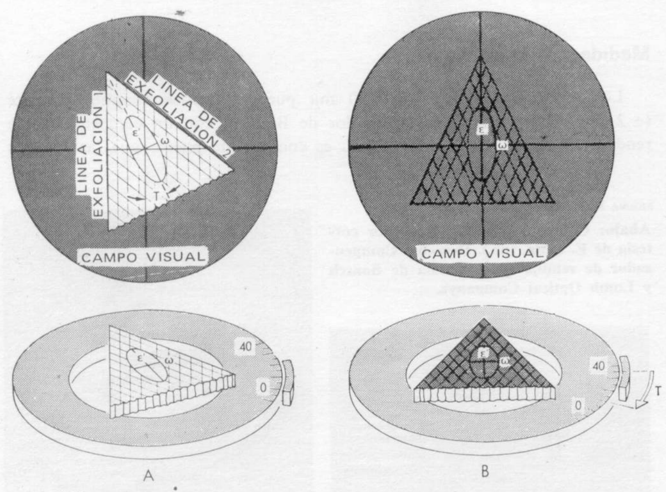



FIGURA 8-19

**Medida del ángulo de extinción. (A) La platina se ha girado hasta que la dirección cristalográfica, línea de exfoliación 1 en este caso, queda paralela a la dirección privilegiada del polarizador, es decir, al hilo N-S del retículo. (B) Giro de la platina hasta un ángulo T necesario para que el grano quedara extinguido. El ángulo T es la diferencia entre las lecturas de la platina en (A) y (B).**

ción. El ángulo de extinción entre la línea de exfoliación 1 y la segunda dirección privilegiada (ω) sería (90° — *T*). Esta relación complementaria siempre se cumple, pues las dos direcciones privilegiadas son mutuamente perpendiculares.

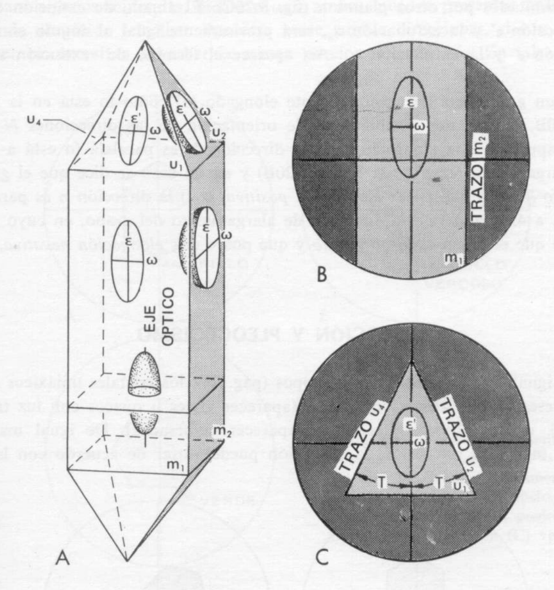



FIGURA 8-20

**(A) Intersecciones entre la indicatriz óptica y las caras prismáticas (m) y piramidales (u) de un cristal tetragonal. (B) Aspecto, entre nicoles cruzados, de un fragmento del cristal que está apoyado en una cara prismática y tiene como límites laterales la traza de las otras. El ángulo entre la traza de $m_2$ y la dirección privilegiada ϵ del grano es de 0 grados; por esta razón se dice que el grano tiene** extinción paralela. **(C) Aspecto, entre nicoles cruzados, de un fragmento en posición de extinción que esté descansando en una cara piramidal y esté limitado por los trazos de otras dos. El ángulo T entre su dirección privilegiada y las trazas de $u_2$ o $u_4$ es igual. Este grano presenta una** extinción simétrica. **Con el objeto de aclarar más las cosas, los cristales extinguidos de (B) y (C) se han representado ligeramente más claros que el fondo.**

En los cristales uniáxicos sólo se observan dos tipos de extinción: 1) *paralela,* y 2) *simétrica.* El tipo depende de si las direcciones cristalográficas a que nos referimos son paralelas (véanse planos *m* en la figura 8-20A) o forman ángulo (véanse planos *u* en la figura 8-20A) con el eje óptico del cristal. Un cristal elongado que reposa sobre uno de los planos *m* y está limitado por

otro de ellos (fig. 8-20B) presenta extinción paralela; el ángulo $T$ es igual a cero grados. Por otra parte, los fragmentos de un cristal que se exfolian paralelamente a las caras piramidales —es decir, paralelo a las caras marcadas con $u$ en la figura 8-20A— estarán descansando sobre un plano $u$ y estarán limitados por otros planos $u$ (fig. 8-20C). El ángulo de extinción entre la dirección $\epsilon'$ y la exfoliación $u_4$, será precisamente igual al ángulo entre la dirección $\epsilon'$ y la exfoliación $u_2$. Así aparece el término de «extinción simétrica».

Si un grano está dimensionalmente elongado tal como lo está en la figura 8-20B, existen dos posibilidades de orientación de las direcciones $N$ y $n$ con respecto a esta elongación: 1) la dirección $N$ es paralela (o está a 45°) del alargamiento (caso de la figura 8-20B) y en tal caso se dice que el grano es *largo lento* o que posee *elongación positiva,* o 2) la dirección $n$ es paralela (o está a 45 grados) de la dirección de alargamiento del grano, en cuyo caso se dice que el grano es *largo rápido* y que posee una *elongación negativa.*

## ABSORCIÓN Y PLEOCROÍSMO

Al igual que los materiales isótropos (pág. 28), los cristales uniáxicos pueden presentar una absorción general (aparecer grises u opacos con luz transmitida), o una absorción selectiva (aparecer coloreados). De igual manera que el índice de refracción, la absorción puede variar de acuerdo con la di-

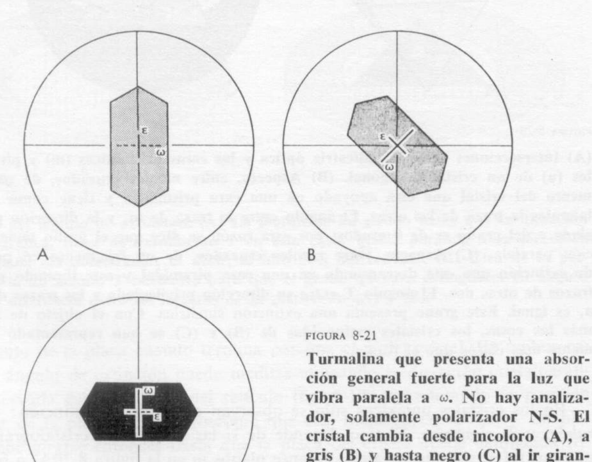



FIGURA 8-21

**Turmalina que presenta una absorción general fuerte para la luz que vibra paralela a ω. No hay analizador, solamente polarizador N-S. El cristal cambia desde incoloro (A), a gris (B) y hasta negro (C) al ir girando la platina del microscopio. En la posición de (C) el cristal absorbe casi toda la luz que vibra N-S.**

rección de vibración en un cristal uniáxico. La turmalina, por ejemplo, generalmente absorbe de manera intensa la luz que vibra paralela a una dirección ω mientras que para la luz que se transmite paralela a su eje óptico es muy transparente (fig. 8-21).

Para algunos minerales, bien ϵ o ω, o ambos, pueden presentar una dirección de absorción selectiva. Por otra parte, ambas direcciones, si son absorbentes, no necesitan absorber la misma porción del espectro. En tales casos,

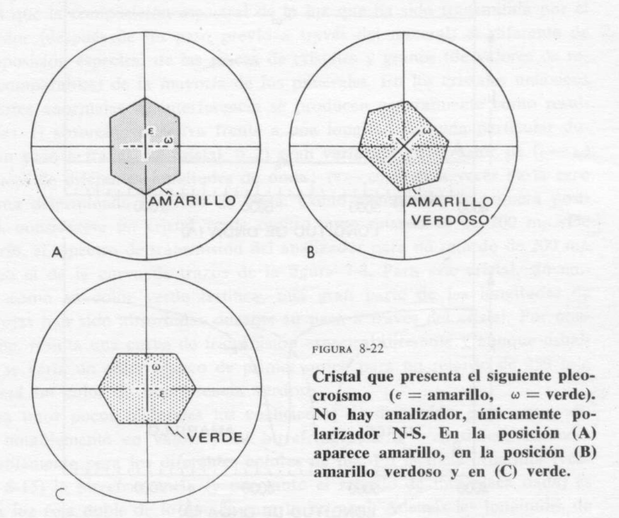



FIGURA 8-22

**Cristal que presenta el siguiente pleocroísmo (ϵ = amarillo, ω = verde). No hay analizador, únicamente polarizador N-S. En la posición (A) aparece amarillo, en la posición (B) amarillo verdoso y en (C) verde.**

una placa de cristal, que gira en un haz de luz polarizada, transmite diferentes colores según si la dirección ϵ o la ω es paralela a la dirección privilegiada del polarizador (fig. 8-22). Este cambio de color al girar el haz de luz polarizada se denomina *pleocroísmo*.

Los coeficientes de absorción (4) de un cristal para luz que vibra a 90° y a 0° del eje óptico —simbolizados respectivamente como $k_\omega$ y $k_\epsilon$— pueden variar para luces de diferentes longitudes de onda. La figura 8-23A ilustra esta variación para un cristal que presenta una absorción general para la luz que vibra perpendicular al eje óptico, y una absorción pequeña para la luz que vibra paralela al eje óptico. La figura 8-23B ilustra de igual forma la variación $k_\omega$ y $k_\epsilon$ de un cristal que absorbe selectivamente todas las longitudes de onda menos la verde para la luz que vibra perpendicular al eje óptico y todas las longitudes de onda menos la amarilla para la luz que vibra paralela al eje óptico. Este segundo cristal tiene pues la siguiente fórmula pleocroica: ω = verde; ϵ = amarillo. Para una luz de una determinada longitud de onda

(4) Véase pág. 29 para la definición de coeficientes de absorción.

que vibre en el cristal formando un ángulo $\theta$ con el eje óptico, el coeficiente de absorción $k_{\epsilon'}$ varía entre $k_\epsilon$ y $k_\omega$ para esta longitud de onda, acercándose a $k_\epsilon$ a medida que el valor de $\theta$ decrece. Por esta razón, los colores del pleocroísmo pueden variar de acuerdo con la orientación de la sección dentro del

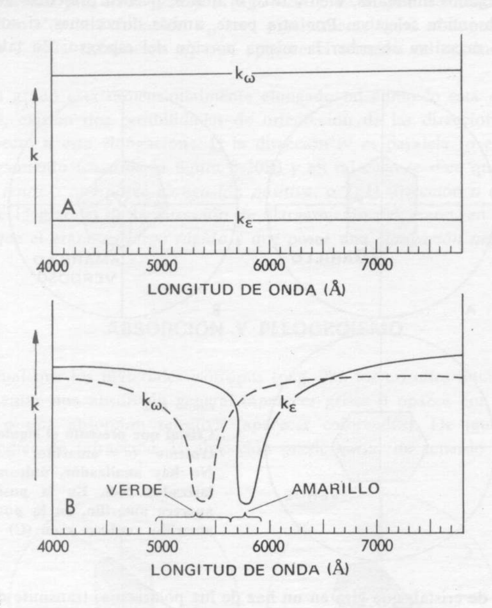



FIGURA 8-23

**Variación de los coeficientes de absorción de la luz que vibra paralela al eje óptico (k ) y normal a él (K ), según las diferentes longitudes de onda. (A) Para el cristal de la figura 8-21, en el cual la luz que vibra perpendicular al eje óptico queda casi completamente absorbida para todas las longitudes de onda, mientras que la luz que vibra paralela al eje óptico se transmite casi por completo. (B) Para el cristal de la figura 8-22 en la cual el pleocroísmo era $\epsilon$ = amarillo y $\omega$ = verde.**

cristal. Por ejemplo, una placa cortada casi perpendicular al eje óptico —de forma que $\epsilon'$ difiera muy poco de $\omega$— presenta los siguientes colores de pleocroísmo si se ve con luz polarizada plana: $\epsilon'$ = verde amarillento; $\omega$ = verde. Una placa cortada exactamente perpendicular al eje óptico aparecería verde en todas las posiciones de la platina.

## COLORES ANORMALES DE INTERFERENCIA

Un color anormal de interferencia es aquel cuyo matiz no iguala a ningún color normal de interferencia de la escala (fig. 8-17). Los colores anormales indican que la composición espectral de la luz que ha sido transmitida por el analizador (después de un paso previo a través del mineral) es diferente de la composición espectral de las placas de cristales y granos (de valores de retardo comparables) de la mayoría de los minerales. En los cristales uniáxicos los colores anormales de interferencia se producen generalmente como resultado de: 1) absorción selectiva frente a una longitud de onda particular durante su paso a través del cristal, o 2) gran variación en el valor de $(\epsilon - \omega)$ para luces de diferentes longitudes de onda; $(\epsilon - \omega)$ llega a veces hasta cero para una determinada longitud de onda. Como ejemplo de la primera posibilidad, considérese un cristal verde oscuro cuyo retardo es de 200 m$\mu$. De ordinario, el espectro de transmisión del analizador para un retardo de 200 m$\mu$ es como el de la curva de trazos de la figura 7-8. Para este cristal, sin embargo, como su color verde testifica, una gran parte de las longitudes de onda rojas han sido absorbidas durante su paso a través del cristal. Por consiguiente, resulta una curva de transmisión espectral diferente y aunque usualmente se vería un color blanco de primer orden para un retardo de 250 m$\mu$, aparecerá un color de interferencia verdoso.

Para unos pocos minerales los coeficientes de dispersión para $\epsilon$ y $\omega$ difieren notablemente en valor, y su birrefringencia $(\epsilon - \omega)$ difiere entonces apreciablemente para los diferentes colores de luz. En la metatorbernita (véase fig. 8-15) la birrefringencia (y por tanto el retardo de una placa dada) es para la luz roja doble de lo que es para la luz azul. Además las longitudes de onda en la región de 5120 Å para los cuales la metatorbernita es isótropa, quedarán completamente extinguidas por el analizador (y por tanto estarán ausentes en la composición espectral de los colores de interferencia) para todas las placas de metatorbernita sea cual sea su espesor. Por consiguiente, las placas de metatorbernita presentan, entre nicoles cruzados, colores anormales de interferencia; en todos ellos faltan longitudes de onda de alrededor de 5120 Å.

## IDENTIFICACIÓN MINERAL

Después de haber medido $\epsilon$ y $\omega$ con precisión para un mineral uniáxico conocido, las especies minerales a las que pertenece pueden ser determinadas consultando las figuras II-1 ó II-2 en el apéndice II (págs. 279-280). Los detalles de este método de investigación se dan en las páginas 268-269.

# 9

# Cristales biáxicos

Un cristal biáxico pertenece al sistema ortorrómbico, monoclínico o triclínico y posee *tres* índices de refracción principales, generalmente designados por $\alpha$, $\beta$ y $\gamma$. De éstos, $\alpha$ y $\gamma$ representan respectivamente el menor y el mayor de los índices de refracción existentes en el cristal; $\beta$ tiene un valor intermedio entre aquellos dos. Con menos frecuencia se usan a veces otros símbolos para estos índices (tabla 9-1).

TABLA 9-1

Símbolos de los índices de refracción
(y frecuencia de su empleo en %)

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Indice más pequeño | $\alpha$ | $n_\alpha$ | $n_p$ | $n_x$ | $nX$ | $X$ | $n_a$ | $N_x$ | $n_1$ |
| » intermedio | $\beta$ | $n_\beta$ | $n_m$ | $n_y$ | $nY$ | $Y$ | $n_b$ | $N_y$ | $n_2$ |
| » mayor | $\gamma$ | $n_\gamma$ | $n_g$ | $n_z$ | $nZ$ | $Z$ | $n_c$ | $N_z$ | $n_3$ |
| Frecuencia en 42 textos recientes y en trabajos específicos (¹) | | | | | | | | | |
| | 47,6 | 26,1 | 9,5 | 11,9 | 2,4 | | 2,4 | | |
| Frecuencia de su empleo por 39 científicos europeos (²) | | | | | | | | | |
| | 71,8 | 7,7 | 15,4 | 5,1 | | | | | |
| Frecuencia de su empleo en 27 artículos en el *American Mineralogist,* 1956 | | | | | | | | | |
| | 74,1 | | | 3,7 | 14,8 | | 3,7 | 3,7 | |

(¹) Datos proporcionados por el N. C. M. S. A. (1957) (Comité de nomenclatura de la Sociedad Mineralógica de América).

(²) Informe de Earl Ingerson, de su visita en 1954 a Dinamarca, Finlandia, Francia, Alemania, Gran Bretaña, Holanda, Islandia, Noruega, Suecia y Suiza.

## INDICATRIZ BIÁXICA

Igual que en los cristales uniáxicos, el índice de refracción para la luz monocromática varía según su dirección de vibración en los cristales biáxicos. Dentro de estos cristales pueden ser localizadas dos direcciones únicas, mutuamente perpendiculares, para las cuales, y solamente para ellas, el cristal presenta sus índices de refracción máximo y mínimo, $\gamma$ y $\alpha$. Para una tercera dirección, en ángulo recto con aquellas dos, el cristal presenta el índice de

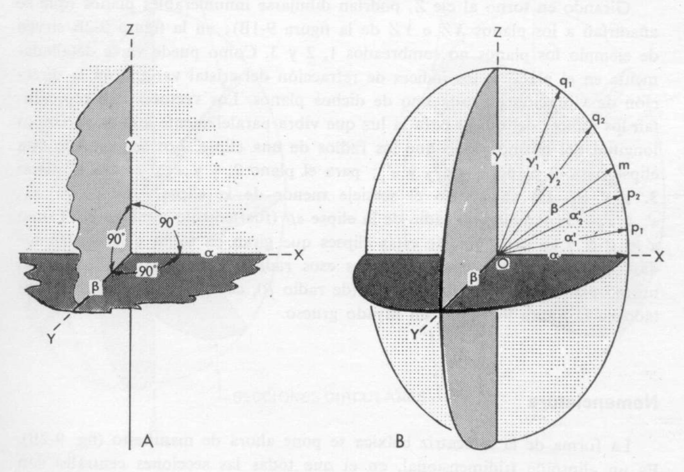



FIGURA 9-1

**(A) Los tres ejes de vibración principales X, Y y Z mutuamente perpendiculares, y los símbolos más frecuentes para los índices de refracción en un mineral biáxico de la luz que vibra paralela a ellos. (B) Distribución elíptica de los índices de refracción (representados por la longitud del vector) para la luz que vibra paralela a $op_1$, $op_2$, om, $oq_2$, $oq_1$ dentro del plano XZ.**

refracción $\beta$. Estas tres direcciones, generalmente representadas por $X$, $Y$ y $Z$, son llamadas los tres *ejes de vibración principal.* La correspondencia entre esas direcciones y los índices de refracción del cristal para la luz que vibra paralelamente a ellas, es siempre como se muestra en la figura 9-1A.

Para las direcciones de vibración no coincidentes con $X$, $Y$ o $Z$, el valor de los correspondientes índices de refracción estará generalmente entre $\alpha$ y $\beta$ o entre $\beta$ y $\gamma$. En el primer caso, el índice se representa por $\alpha'$, en el segundo se representa por $\gamma'$. Por lo tanto se cumple siempre la relación que expresamos a continuación: $\alpha < \alpha' < \beta < \gamma' < \gamma$.

Consideremos ahora unas cuantas vibraciones generales dentro del plano $XZ$ (de puntos en la figura 9-1B). La variación de la longitud de estos radios, dibujados para representar el índice de refracción del cristal para cada vibración, define una elipse cuyo semieje menor es $\alpha$ y cuyo semieje mayor es $\gamma$. Obsérvese que la longitud *om* es exactamente igual a $\beta$. Análogamente las longitudes de las vibraciones en el plano débilmente sombreado $YZ$ también definen una elipse (el semieje menor es $\beta$, el mayor $\gamma$), y para las que están contenidas en el plano $XY$ (fuertemente sombreado), se define una tercera elipse (semieje menor, $\alpha$; semieje mayor, $\beta$). La figura 9-1B ilustra la estructura fundamental de la indicatriz biáxica.

Girando en torno al eje $Z$, podrían dibujarse innumerables planos (que se añadirían a los planos $XZ$ e $YZ$ de la figura 9-1B); en la figura 9-2B sirven de ejemplo los planos no sombreados 1, 2 y 3. Como puede verse detalladamente en el plano 2, los índices de refracción del cristal varían con la dirección de vibración en cada uno de dichos planos. Los vectores que representan los índices del cristal para la luz que vibra paralelamente a ellos varían en longitud del mismo modo que los radios de una elipse. Los semiejes de esta elipse para el plano 1 son $\gamma$ y $\alpha'_1$; para el plano 2, $\gamma$ y $\alpha'_2$; y para el plano 3, $\gamma$ y $\alpha'_3$. En cada caso el semieje menor de la elipse —es decir: $\alpha'_1$, $\alpha'_2$ o $\alpha'_3$— es también un radio de la elipse $\alpha\beta$ (fuertemente sombreada). Como $\alpha' < \beta < \gamma$ en cada una de estas elipses que giran en torno a $Z$ existen radios iguales a $\beta$ en longitud. Todos esos radios $\beta$ están contenidos en el mismo plano y definen dos círculos (de radio $\beta$), cada uno de ellos representado en la figura 9-2A por un rayado grueso.

## Nomenclatura

La forma de la indicatriz biáxica se pone ahora de manifiesto (fig. 9-2B). Es un elipsoide tridimensional, en el que todas las secciones centrales son elípticas excepto dos. Estas dos, una sin sombrear y la otra de rayado grueso en la figura 9-2B, son las *secciones circulares,* siendo $\beta$ el radio de cada una. Las dos normales a estas secciones circulares, *AA'* y *BB'*, son llamadas *ejes ópticos,* término a menudo abreviado por O. A. Por existir dos de tales ejes ópticos (cada uno de ellos comparable con el eje óptico único de la indicatriz uniáxica), el origen del nombre indicatriz biáxica es obvio ([3]). Los dos ejes ópticos siempre están contenidos en el plano $XZ$ ($\alpha\gamma$), llamado por este motivo *plano óptico.* La dirección de vibración principal $Y$, por ser siempre normal al plano óptico, se llama *normal óptica* (N. O. abreviadamente). El ángulo agudo entre los dos ejes ópticos se llama $2V$ o sencillamente, *ángulo de los ejes ópticos.* El ángulo obtuso —es decir, ángulo *BOA'*— es siempre el suplementario de $2V$.

El eje de la principal vibración que biseca el ángulo agudo de los ejes

([3]) En terminología geométrica la indicatriz biáxica es un elipsoide de tres ejes que no son los ejes ópticos, sino tres ejes principales $X$, $Y$ y $Z$ perpendiculares entre sí.

ópticos (es decir $X$, en la figura 9-2B) se llama *bisectriz aguda* (abreviadamente A. B. o $Bx_a$). Cuando el eje de la principal vibración biseca el ángulo obtuso de los ejes ópticos se le llama *bisectriz obtusa* (abreviadamente O. B. o $Bx_o$). En la figura 9-2A se presenta a $X$ ($\alpha$) como bisectriz aguda mientras $Z$ ($\gamma$) es la bisectriz obtusa. En muchos minerales esta disposición puede estar invertida; o sea, $Z$ es la bisectriz aguda y $X$ la bisectriz obtusa. En los mi-

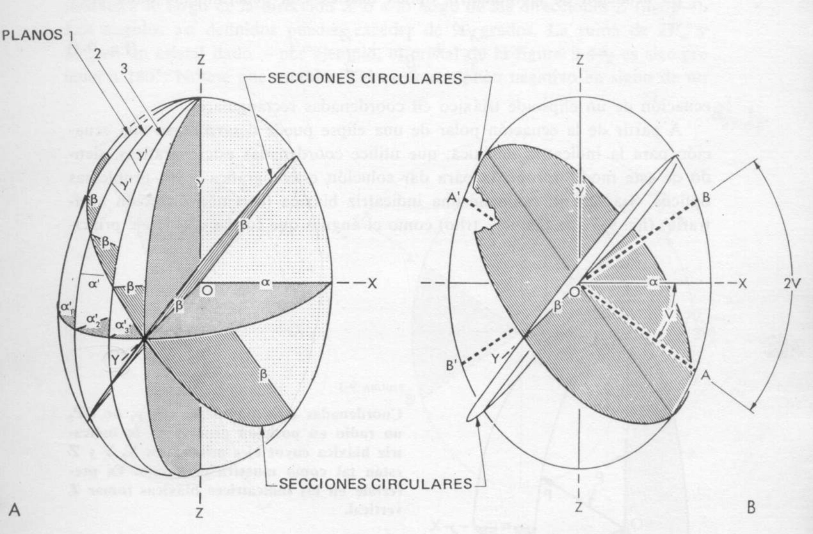



FIGURA 9-2

**(A) Variación del índice de refracción en un cristal biáxico representada por elipses (cuyos radios son proporcionales en longitud al índice de refracción de un cristal donde la luz vibra paralelamente a ellos). Los planos 1, 2 y 3 son ejemplos de las numerosas elipses que podrían dibujarse girando en torno de ZZ. Todas estas elipses tienen un radio de longitud igual a $\beta$; estos radios están contenidos en los mismos planos (rayados). Estos planos, secciones circulares, intersectan según el eje principal Y. (B) Indicatriz biáxica: o sea, sencillamente un elipsoide tridimensional imaginario cuyos radios son proporcionales a los índices de refracción del cristal para la luz que vibra paralela a ellos. Las normales a las secciones circulares, AA′ y BB′ son los dos ejes ópticos.**

nerales biáxicos el signo óptico depende de esta circunstancia. Se definen como cristales biáxicos ( + ) aquellos para los que $Z$ ($\gamma$) es la bisectriz aguda, y cristales biáxicos (—) son aquellos para los que $X$ ($\alpha$) es la bisectriz aguda. En los minerales ( + ) $\beta$ se aproxima más en valor a $\alpha$ que a $\gamma$. En los minerales (—), $\beta$ en general está más próximo en valor a $\gamma$ que a $\alpha$, pero puede haber alguna rara excepción, particularmente para minerales en los

que $2V$ está próximo a los 90 grados. La indicatriz biáxica de un mineral se acostumbra a representar con $Z$ vertical.

## Ecuaciones de la indicatriz biáxica

La ecuación de la indicatriz óptica biáxica está generalmente dada por:

$$\frac{X^2}{\alpha^2} + \frac{Y^2}{\beta^2} + \frac{Z^2}{\gamma^2} = 1 \qquad \text{(Ec. 9-1)}$$

ecuación de un elipsoide triáxico en coordenadas rectangulares.

A partir de la ecuación polar de una elipse puede desarrollarse una ecuación para la indicatriz uniáxica, que utilice coordenadas estereográficas, siendo de este modo apropiada para dar solución estereográfica a los problemas ópticos. Sea $OP$ un radio de una indicatriz biáxica (con una dirección arbitraria) (fig. 9-3). Se define $\rho$ (rho) como el ángulo que forma con el eje princi-

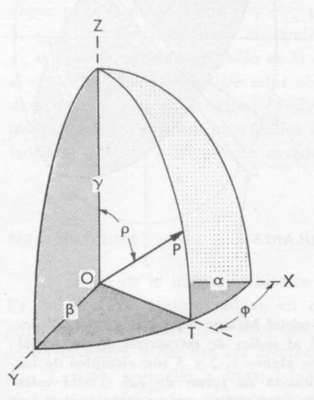



FIGURA 9-3

**Coordenadas estereográficas, $\phi$ y $\rho$, de OP, un radio en posición general de la indicatriz biáxica cuyos ejes principales X, Y y Z están tal como muestra el dibujo. Es preferible en las indicatrices biáxicas tomar Z vertical.**

pal $Z$, y $\phi$ (phi) como el ángulo entre $X$ y el plano no sombreado que contiene $OP$ y $Z$. De este modo $\phi$ y $\rho$ representan las coordenadas estereográficas que permiten determinar la línea $OP$ en la indicatriz; tales cordenadas estereográficas se analizan detalladamente en el capítulo 11. La longitud de $OP$, y por consiguiente el índice $\gamma'_{op}$ del cristal (o $\alpha'_{op}$, si el cálculo demuestra que es menor que $\beta$) para la luz que vibra paralelamente a $OP$, puede calcularse a partir de la siguiente ecuación:

$$\gamma'_{op} \text{ (o } \alpha'_{op}) = \frac{1}{\sqrt{\dfrac{\operatorname{sen}^2 \rho \cos^2 \phi}{\alpha^2} + \dfrac{\operatorname{sen}^2 \rho \operatorname{sen}^2 \phi}{\beta^2} + \dfrac{\cos^2 \rho}{\gamma^2}}} \qquad \text{(Ec. 9-2)}$$

## Variación y cálculo de 2V

Si el ángulo entre los dos ejes ópticos se designa $2V$, es por definición el ángulo agudo entre ellos. Ahora bien, va en aumento el convenio de usar los símbolos $2V_x$ o $2V_z$ para designar el ángulo entre los ejes ópticos según sea medido a lo largo de la dirección $X$ o a lo largo de las direcciones $Z$ (fig. 9-4). Los ángulos así definidos pueden exceder de 90 grados. La suma de $2V_x$ y $2V_z$ en un cristal dado —por ejemplo, el cristal de la figura 9-4— es siempre igual a 180°. Nótese que establecer el carácter óptico negativo en signo de un

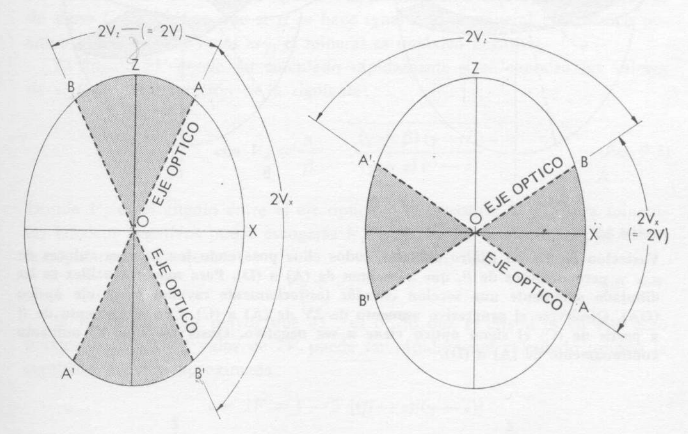



FIGURA 9-4

**Relación entre $2V_x$ y $2V_z$. Obsérvese que $2V = 2V_x$ ó $2V_z$ según cual sea el más pequeño. Las líneas de trazos representan los ejes ópticos.**

cristal biáxico con $2V = 370°$ puede ser sucintamente expresado en este nuevo simbolismo por $2V_x = 37°$ o, de otra manera, por $2V_z = 143°$. Cualquiera de estas últimas consideraciones implica que $X$ biseca el ángulo agudo entre los ejes ópticos y que $Z$ biseca el ángulo obtuso entre ellos.

El valor del ángulo óptico axial, $2V$, depende de que el valor de $\beta$ se aproxime más a $\alpha$ que a $\gamma$ o viceversa. Si, por ejemplo, $\beta$ difiere muy poco de $\alpha$ y bastante de $\gamma$ (véase fig. 9-5A), entonces *Om* (el radio que en la elipse $\alpha\gamma$ es igual a $\beta$) forma un ángulo pequeño con la elipse no sombreada $\alpha\beta$. De este modo $2V$ es muy pequeño, y $\gamma$ es la bisectriz aguda. Considérese ahora un segundo mineral poseyendo los mismos valores para $\alpha$ y $\gamma$ pero donde $\beta$ tiene un valor mayor (fig. 9-5B). En este caso, *Om* forma un ángulo mayor con la elipse $\alpha\beta$. Por tanto $V$ (y en consecuencia $2V$) es mayor que para el primer mineral.

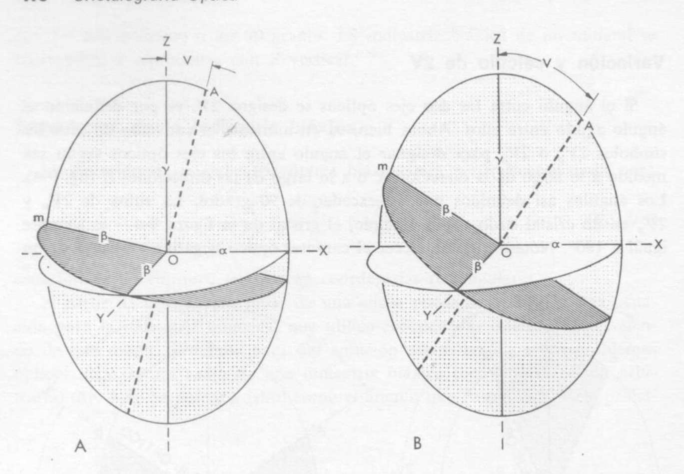



FIGURA 9-5

**Variación de 2V en cuatro cristales, todos ellos poseyendo los mismos valores de $\alpha$ y $\gamma$, pero distintos de $\beta$, que aumentan de (A) a (D). Para mayor sencillez se ha dibujado solamente una sección circular (estrechamente rayada) y un eje óptico (OA). Obsérvese el progresivo aumento de 2V de (A) a (C). Con el aumento de $\beta$ a partir de (C) el signo óptico viene a ser negativo. Obsérvese que $V_z$ aumenta continuamente de (A) a (D).**

Para un tercer mineral, nuevamente vamos a considerar los mismos valores para $\alpha$ y $\gamma$, pero en este caso vamos a suponer que $\beta$ tiene un valor aproximado (pero no igual) al medio entre $\alpha$ y $\gamma$ (fig. 9-5C). Para este mineral, $V$ vale 45° y $2V$ 90°. En consecuencia ni $\alpha$ ni $\gamma$ pueden ser considerados como bisectriz aguda, ya que el ángulo $2V$ es de 90° pero no agudo. De aquí que este tercer mineral no sea ni positivo ( + ) ni negativo ( — ). Para un cuarto mineral, $\alpha$ y $\gamma$ tienen el mismo valor que en los casos anteriores, pero el valor $\beta$ ahora es muy parecido al de $\gamma$ (fig. 9-5D). Consecuentemente, $Om$ (el radio que en la elipse $\alpha\gamma$ es igual a $\beta$) está muy próximo al eje $Z$. De aquí, que el ángulo entre $OX$ y $OA$ (el eje óptico) sea ahora agudo; $OX$ viene a ser en este caso la bisectriz aguda. Por consiguiente este cuarto mineral es de signo ( — ). Nótese que si $\beta$ se hace igual a $\alpha$, el mineral es uniáxico positivo y si $\beta$ se hace igual a $\gamma$, el mineral es uniáxico negativo.

El ángulo $2V$ puede ser calculado rápidamente si se conocen los valores de $\alpha$, $\beta$ y $\gamma$. La relación es la siguiente:

$$\cos V_z = \frac{\alpha}{\beta} \sqrt{\frac{(\gamma + \beta)(\gamma - \beta)}{(\gamma + \alpha)(\gamma - \alpha)}} \qquad \text{(Ec. 9-3)}$$

Donde $V_z$ es el ángulo entre el eje óptico y la dirección $Z$ [4]. Para minerales biáxicos negativos puede escogerse $V_z$. Si $V_z$ se ha calculado, $V_x$ se calcula rápidamente ya que:

$$V_z + V_x = 90° \qquad \text{(Ec. 9-4)}$$

Si $V_z$ es un valor mayor que 45°, es obvio que el cristal es en este caso biáxico negativo. El valor de $2V$ puede ser rápidamente calculado usando la siguiente relación aproximada:

$$\cos 2V = 1 - 2\ [(\beta - \alpha)/(\gamma - \alpha)]$$

el valor obtenido no diferirá en más de 2° del real. Los valores negativos para cos $2V$ indican que el cristal tiene signo óptico negativo; los valores positivos indican que se trata de cristales ópticamente positivos.

La ecuación 9-3 permite que, dadas tres cualesquiera de las cuatro variables $\alpha$, $\beta$, $\gamma$ y $V$, la cuarta pueda ser calculada. El monograma (fig. 9-6A) ideado por J. B. Mertie (1942, pág. 538) elimina la necesidad de cualquier tipo de cálculos. La figura 9-6B ilustra su utilización. Basta colocar una regla transparente de modo que indique el valor de $\alpha$ en el borde izquierdo del diagrama (punto 1) y el valor de $\gamma$ en su borde derecho (punto 3). Se localiza el punto que pertenece a la línea que une 1 con 3 y para el cual el índice de refracción vale $\beta$ (es decir: el punto 2 en la figura 9-6B). La línea vertical que pasa por el punto 2 (señalada con una flecha en la figura 9-6B) indica el

(4) La ecuación 9-3 puede derivarse de la ecuación 9-2 igualando $\phi = 0°$ (que reduce la ecuación 9-2 a la ecuación polar de la elipse $\alpha\gamma$) y sustituyendo $\beta$ por $\gamma'_{op}$. El valor particular de $\varrho$ que satisface la ecuación resultante es entonces el complemento de $V$ (esta relación complementaria ha quedado de manifiesto en las figuras 9-5 C y D, donde el ángulo $mOZ$ es $\varrho$). Los cálculos algebraicos y la identidad cos $V_z$ = sen $\varrho$ conducen por último a la ecuación 9-3.

valor de $2V$ en la escala superior o inferior de la figura 9-6A. Así pues, en la figura 9-6B, $\alpha = 1{,}550$, $\beta = 1{,}630$, $\gamma = 1{,}650$, $2V$ vale 50 grados, y el signo del mineral será ( — ). Análogamente, si son conocidos $2V$, el signo óptico y dos de los tres índices $\alpha$, $\beta$ y $\gamma$, pueden localizarse los puntos 1, 2 y 3 (son siempre colineales). Consecuentemente, el valor del tercer índice puede determinarse a partir del valor ordinario de los puntos 1, 2 ó 3 (dependiendo de $\alpha$, $\beta$ y $\gamma$, ya que representan el valor desconocido).

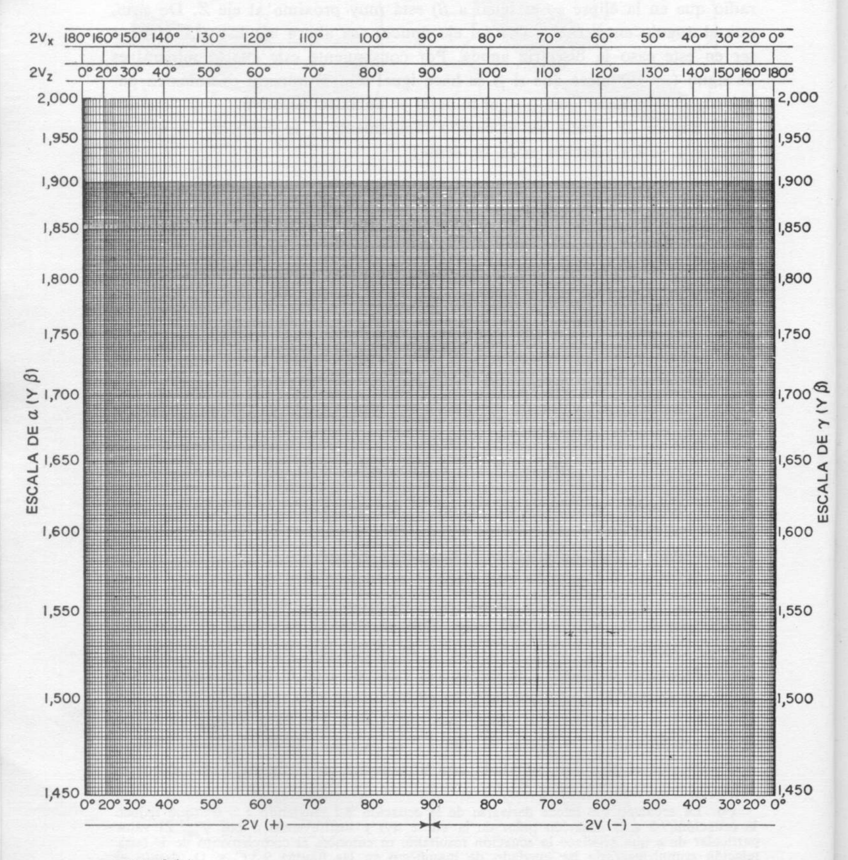



FIGURA 9-6 A

**El diagrama de Mertie.**

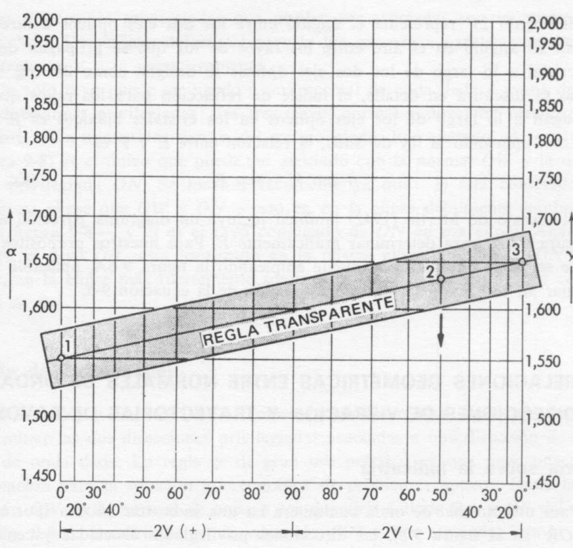



FIGURA 9-6 B

**Método para determinar 2V con el diagrama de Mertie (fig. 9-6 A) a partir de los valores de α (punto 1), β (punto 2) y γ punto 3). La regla transparente tiene una recta a lo largo de su cara inferior.**

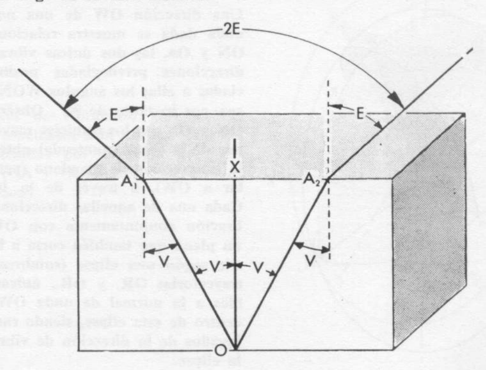



FIGURA 9-7

**Relación entre 2E y 2V, que representa la refracción en el aire de dos rayos tales que, dentro del cristal, se propagan según los ejes ópticos, $OA_1$ y $OA_2$. Si estos dos rayos emergen en un medio de diferente índice que el aire, el ángulo entre ellos se llama 2H en vez de 2E.**

El ángulo $2V$ representa el ángulo entre los dos ejes ópticos dentro del cristal. El ángulo en el aire entre los rayos de luz que se propagan dentro del cristal a lo largo de los dos ejes ópticos se designa como $2E$ (fig. 9-7). Como se discutirá en detalle, el índice de refracción para los rayos que se propagan a lo largo de los ejes ópticos en los cristales biáxicos es $\beta$. Por lo tanto, aplicando la ley de Snell, la relación entre $E$ y $V$ es

$$\beta \text{ sen } V = \text{sen } E \qquad \text{(Ec. 9-5)}$$

El trabajo de Mertie (1942) también incluye un diagrama parecido al de la figura 9-6A, para determinar gráficamente $E$. Para nuestros propósitos, $2V$ puede ser determinado gráficamente empleando la figura 9-6A, aplicable para calcular $2E$ utilizando la inmediata solución de la ecuación 9-5.

## RELACIONES GEOMÉTRICAS ENTRE NORMALES DE ONDA, DIRECCIONES DE VIBRACIÓN Y TRAYECTORIAS DE RAYOS

### Teoría sobre la indicatriz

Para una normal de onda cualquiera en una indicatriz biáxica (por ejemplo *OW* en la figura 9-8), las direcciones privilegiadas asociadas yacen, por definición, en un plano perpendicular a la onda normal. Cuando este plano,

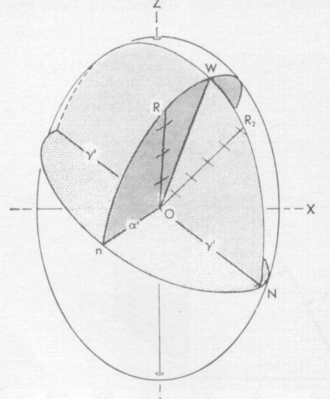



FIGURA 9-8

**Una dirección OW de una normal de onda dada se muestra relacionada con ON y On, las dos únicas vibraciones o direcciones privilegiadas posibles asociadas a ella; los ángulos WON y WOn son por lo tanto de 90°. Obsérvese que ON y On son los semiejes mayor y menor de la elipse (punteada) obtenida por la intersección de un plano (perpendicular a OW), a través de la indicatriz. Cada una de aquellas direcciones de vibración conjuntamente con OW define un plano que también corta a la indicatriz según una elipse (sombreada). Las trayectorias $OR_1$ y $OR_2$, únicas asociables a la normal de onda OW, juegan dentro de esta elipse, siendo radios conjugados de la dirección de vibración de la elipse.**

que contiene el centro de la indicatriz, llega a la superficie de ésta, la corta según una elipse (punteada en la figura 9-8). Los semiejes mayor y menor de esta elipse (por ejemplo *ON* y *On* en la figura 9-8) representan las dos

únicas direcciones privilegiadas que pueden ser asociadas con la normal de onda dada. Los índices del cristal para la luz que vibra paralelamente a *On* o a *ON* son $\alpha'$ y $\gamma'$ respectivamente.

Un solo rayo puede ser ligado a una normal de onda dada y a una de sus dos direcciones privilegiadas; los tres (rayo, normal y dirección privilegiada) siempre están contenidos dentro del mismo plano. Por ejemplo, el rayo $OR_2$ (figura 9-8) es el único que puede ser asociado con la normal *OW* y la dirección privilegiada *ON*. Se localiza fácilmente ya que: 1) está contenido en la misma elipse que *OW* y *ON* —esto es, en la elipse débilmente sombreada de la figura 9-8—, y 2) es el rayo conjugado de *ON* en esa elipse. Análogamente, el rayo $OR_1$ está localizado en la misma elipse que *OW* y *ON* —es decir, en la elipse más fuertemente sombreada de la figura 9-8— y es conjugado de *On*.

## Regla de Biot-Fresnel

Biot (1820) y Fresnel (1827) también formularon una regla que permite determinar las dos direcciones privilegiadas asociadas a una dirección de normal de onda dada. La regla es de gran uso práctico ya que tiene una fácil adaptación para la solución estereográfica de problemas ópticos. Dada la dirección *OW* de la normal de onda y los dos ejes ópticos *OA* y *OB* del cristal (fig. 9-9A), las direcciones de vibración *WN* y *Wn* asociadas con la normal de onda *OW* pueden localizarse como sigue: se construye un plano que contenga *OA* y *OW* y otro conteniendo a *OB* y *OW* (en la figura 9-9A, cada uno de ellos es el rayado con trazo fijo). Las direcciones de vibración *WN* y *Wn*, están contenidas en los planos no sombreados que bisecan el ángulo que

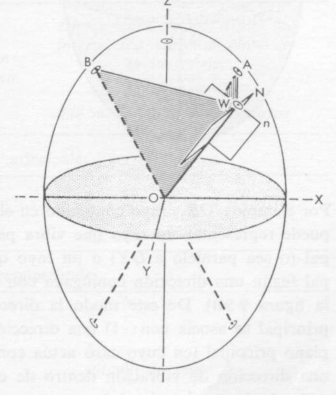



FIGURA 9-9 A

**Direcciones de vibración, WN y Wn, que son asociables a la normal de onda OW, obtenidas por la regla de Biot-Fresnel. (OA y OB representan los dos ejes ópticos.)**

forman aquellos planos rayados. Debido a que las direcciones de vibración *WN* y *Wn* son necesariamente perpendiculares a *OW*, se conoce su dirección de un modo preciso en el cristal.

## Direcciones de vibración asociadas con un rayo dado

Dado un rayo, el determinar las dos direcciones de vibración asociadas con él representa cierta dificultad, menos en el caso de que el rayo se propague dentro de un plano paralelo a dos de los tres ejes de vibración principales, *X*, *Y* y *Z* (estos planos, para la indicatriz biáxica, son los llamados planos principales). Para los rayos que se propagan en los planos principales, así definidos, la relación entre un rayo y sus dos direcciones de vibración asociadas es análoga a la existente en los cristales uniáxicos (véase pág. 107).

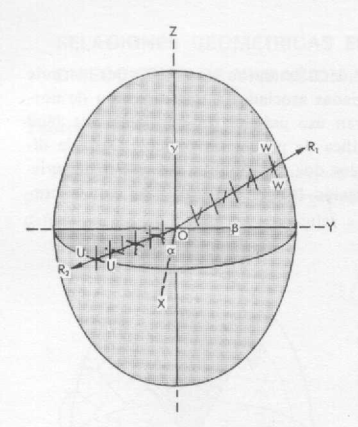



FIGURA 9-9 B

**Direcciones de vibración asociadas con una trayectoria ($OR_1$) dentro de un plano principal (ZY). Una es perpendicular a este plano (o sea paralela a OX); la segunda (WW) está contenida dentro de este plano, siendo la dirección conjugada de la trayectoria. La trayectoria $OR_2$ es un ejemplo adicional.**

Por ejemplo: $OR_1$, rayo contenido en el plano principal *ZY* de la figura 9-9B, puede representar un rayo que vibra perpendicularmente a este plano principal (o sea paralelo a *OX*) o un rayo que vibra dentro de este plano principal según una dirección conjugada con la de su trayectoria (es decir, *WW* en la figura 9-9B). De este modo la dirección de un rayo dentro de un plano principal se asocia con: 1) una dirección de vibración perpendicular a dicho plano principal (en cuyo caso actúa como un rayo *O*) o 2) puede representar una dirección de vibración dentro de este plano principal, la cual es conjugada de la trayectoria del rayo (en cuyo caso actúa como un rayo *E*, no cumpliendo la ley de Snell). El rayo $OR_2$ en la figura 9-9B sirve como un ejemplo adicional.

## Ejemplos de incidencia normal

Igual que en los cristales uniáxicos, la incidencia normal constituye para los cristales biáxicos el más sencillo, a la vez que el más importante, tipo de incidencia. Para la incidencia normal, la conocida ley de Snell indica que cuando la dirección de la normal de onda es perpendicular a la cara o superficie del cristal, la normal de onda de la luz refractada debe serlo también (o sea: $\sphericalangle i = \sphericalangle r = 0°$). Por lo tanto las dos direcciones privilegiadas asociadas con la normal de onda refractada, como deben ser perpendiculares a esta normal de onda, necesariamente han de ser paralelas al plano del cristal que sufre la incidencia normal. Más específicamente, estas dos direcciones privilegiadas representan los ejes mayor y menor de la elipse formada por la intersección de la cara del cristal con la indicatriz, suponiendo siempre que dicha cara pasa por el centro de la indicatriz (véase pág. 97).

Las direcciones de los ejes mayor y menor de esta elipse dé intersección, dependen de la posición de su plano respecto de $X$, $Y$ y $Z$, ejes principales de vibración de la indicatriz. De acuerdo con esto y según que sean paralelos a dos uno o ninguno de estos ejes principales de vibración, los planos cristalográficos pueden ser clasificados (tabla 9-2) en tres grupos: 1) planos prin-

TABLA 9-2

Tipos de planos en la indicatriz biáxica

| *Ejes principales a los que el plano cristalino es paralelo* | *Símbolo óptico convenido para el plano* | *Dimensiones de la elipse de intersección entre el plano y la indicatriz* — *Eje menor* | *Eje mayor* |
|---|---|---|---|
| (1) Planos principales | | | |
| $X, Y$ | $XY$ | $\alpha$ | $\beta$ |
| $X, Z$ | $XZ$ | $\alpha$ | $\gamma$ |
| $Y, Z$ | $YZ$ | $\beta$ | $\gamma$ |
| (2) Planos semigenerales | | | |
| $X$ | $XZ'$ | $\alpha$ | $\gamma'$ |
| $Y$ | $YX'$ | $\alpha'$ | $\beta$ |
| $Y$ | $YZ'$ | $\beta$ | $\gamma'$ |
| $Y$ (sección circular) | $YC$ | círculo de radio $\beta$ | |
| $Z$ | $ZX'$ | $\alpha'$ | $\gamma$ |
| (3) Planos generales | | | |
| Ninguno | $X'Z'$ | $\alpha'$ | $\gamma'$ |

cipales; 2) planos semigenerales, y 3) planos generales. Un plano determinado puede ser designado por dos letras que denotan las direcciones en la indicatriz en las que el plano es paralelo. Las letras $X'$ y $Z'$, por ejemplo, re-

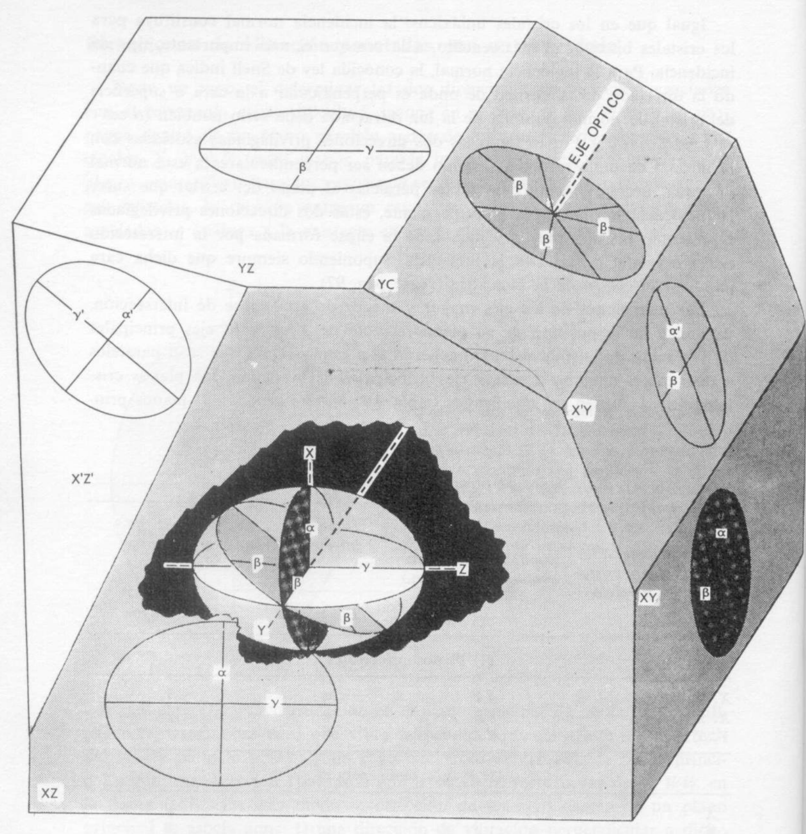



FIGURA 9-10

**La indicatriz biáxica puede verse en el centro del cristal en forma esquelética. Su intersección con las diferentes caras del cristal, al trasladarse desde el centro hasta la superficie cristalina, se ve en varias caras. Los ejes mayor y menor de esas elipses de intersección representan las direcciones privilegiadas del cristal para la incidencia normal a tales caras. Para la cara YC, que corta a la indicatriz según un círculo, existen innumerables direcciones privilegiadas. Los índices de refracción del cristal para las direcciones privilegadas pueden verse también. Véase la tabla 9-2 para comprobar en detalle el simbolismo usado para las caras.**

presentan direcciones dentro de la indicatriz que están a distinto lado de la sección circular. La dirección $X'$ está en el mismo lado que $X$; $Z'$ está en el mismo lado que $Z$. El símbolo $YC$ se ha usado para designar una sección circular, puesto que un plano paralelo a la sección circular es siempre paralelo al eje de vibración principal $Y$. Ejemplo de los diferentes tipos de caras vienen ilustrados en la figura 9-10.

**Planos generales.** Los principios geométricos discutidos al principio (páginas 182-183) regulan la localización de la trayectoria de los rayos refractados en la incidencia normal. La figura 9-11A ilustra el caso general de la incidencia normal sobre un plano general. La normal de onda refractada

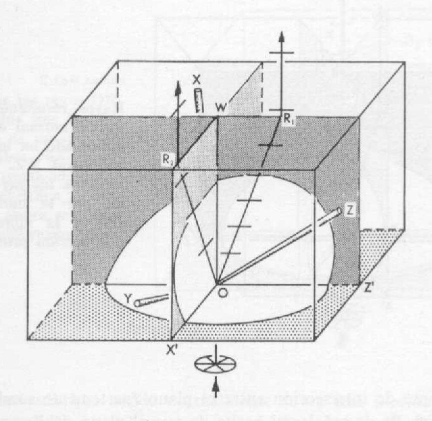



FIGURA 9-11 A

**Trayectorias que se desarrollan dentro de un cristal biáxico como resultado de la incidencia normal de un rayo no polarizado en una sección general (X'Z'). Los planos que contienen los rayos definidos por la onda normal OW y las vibraciones OZ' y OX' están sombreados respectivamente, intensa y levemente, siendo cada uno de ellos una sección general. Las separaciones de las trayectorias $OR_1$ y $OR_2$ de la normal de onda OW han sido exageradas con propósito ilustrativo.**

$OW$ está asociada con cada una de las direcciones de vibración $OZ'$ y $OX'$. Únicamente la trayectoria del rayo $OR_1$ se asocia con la normal de onda $OW$ y con la dirección de vibración $OZ'$; las tres están contenidas dentro del mismo plano (intensamente sombreado en la figura 9-11A). Este plano corta a la indicatriz según una elipse en la que $OR_1$ y $OZ'$ son radios conjugados. Análogamente, la trayectoria del rayo $OR_2$ es la única que puede asociarse a la normal de onda $OW$ y a la dirección de vibración $OX'$. En conclusión, si la luz no polarizada incide normalmente en un plano general, resultan dos rayos, $OR_1$ y $OR_2$. Los dos actúan como rayos extraordinarios no coincidiendo con $OW$, dirección de su normal de onda común. Si la luz incidente está polarizada, resulta el rayo $OR_1$, el $OR_2$ o ambos, teniendo en cuenta además

que la dirección de vibración de la luz es paralela a *OZ'*, a *OX'* o no lo es a ninguna.

**Planos semigenerales.** La figura 9-11B ilustra un caso más especial: se trata de una incidencia normal sobre una sección semigeneral. El caso para el rayo $OR_2$ es semejante al anterior. Ahora bien, el rayo $OR_1$ (el único rayo asociado con la normal de onda *OW* y con la dirección de vibración *OZ*) coincide ahora con *OW* en dirección (ya que *OW* es el radio conjugado de

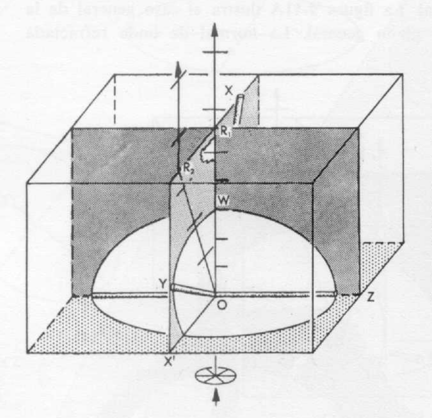



FIGURA 9-11 B

**Rayos resultantes de la incidencia normal de un rayo no polarizado en una sección semigeneral X'Z. El plano que contiene los rayos está definido por la normal de onda OW y la vibración OX' es una sección principal.**

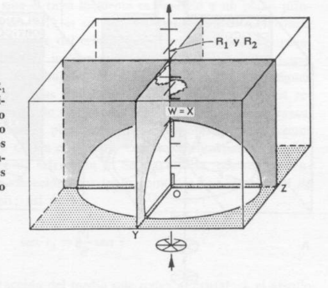
*OZ* en la elipse de intersección entre el plano fuertemente sombreado $R_1OZ$ y la indicatriz). Es de señalar el hecho de que el plano débilmente sombreado es una sección principal *XY* de la indicatriz. Contiene los ejes principales *OY* y *OX* y es perpendicular a *OZ* (y también al plano punteado, que es el plano semigeneral en el cual incide normalmente la luz no polarizada). Ambos rayos $OR_1$ y $OR_2$ juegan en el plano principal *XY* y mantienen la misma relación que los rayos *E* y *O* en un plano principal de un cristal uniáxico (pág. 107 puntos 7-10).

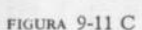
La generalización ya discutida (véase pág. 184) aparece nuevamente: un rayo que viaja en un plano principal de un cristal biáxico vibra o perpendicularmente a este plano (por ejemplo el rayo $OR_1$ en la figura 9-11B) o dentro de este plano según la dirección conjugada de su trayectoria (por ejemplo $OR_2$). Para el primer caso, la trayectoria del rayo y la dirección de vibración son mutuamente perpendiculares y el rayo actúa como un rayo ordinario. Para el segundo, el rayo actúa de un modo similar a un rayo extraordinario, únicamente su normal de onda cumple la ley de Snell.

**Plano principal.** El caso más particular de todos es el que se produce cuando la luz incide normalmente en una sección principal de un cristal biáxico. La figura 9-11C lo ilustra: para luz incidente no polarizada se producen

dos rayos, cada uno de los cuales vibra paralelamente a una dirección principal de la indicatriz y sus trayectorias coinciden con la normal de onda *OW*.

**Sección circular; refracción interna cónica.** Si un cilindro estrecho de luz no polarizada incide normalmente sobre una sección circular de un cristal biáxico, se transforma en un cono hueco de luz dentro del cristal y también en un amplio cilindro hueco después de emerger del cristal (fig. 9-12A). Este fenómeno, conocido como refracción, se explica fácilmente por medio de la teoría de la indicatriz óptica. Como se ha discutido previamente (pág. 83)





FIGURA 9-11 C

**Coincidencia de los rayos $OR_1$ y $OR_2$ producida por la incidencia normal de un rayo no polarizado sobre un plano principal YZ (punteado). Los planos que contienen a ambos rayos son ahora secciones principales (sombreado claro y oscuro).**

la luz no polarizada que incide normalmente sobre una sección circular no está obligada a vibrar paralelamente a alguna dirección particular después de entrar en el cristal. Por tanto, en ambas condiciones, antes y después de entrar en el cristal, la luz no polarizada vibra según las innumerables direcciones existentes dentro de la sección circular; unas cuantas de estas posibles direcciones de vibración están ilustradas en la figura 9-12A, son los radios denominados «$\beta$». Después de entrar en el cristal, todos los rayos luminosos que vibren paralelamente a los diferentes radios poseen en común la dirección *OW* de la normal de onda (como consecuencia de su incidencia normal). Cada una de las diferentes direcciones de vibración, conjuntamente con la normal de onda *OW*, da lugar a una trayectoria diferente de los rayos (véase pág. 182). Por lo tanto, la luz que vibra paralela a *OY* en la figura 9-12B origina el rayo 1 (el rayo 1 es el radio conjugado de $\beta_1$ en la elipse débilmente sombreada *YOW*). Análogamente, la luz que vibra paralela a $\beta_2$ origina el rayo 2 ($\beta_2$ y el rayo 2 son radios conjugados contenidos en la elipse punteada); la luz que vibra paralela a $\beta_3$ produce el rayo 3 ($\beta_3$ y el rayo 3 son radios conjugados en la elipse fuertemente sombreada *WOX'*).

Si como para $\beta_3$ determinamos la trayectoria de los rayos para las numerosas direcciones de vibración existentes entre $\beta_2$ y $\beta_1$, no aparecería una

distribución cónica de esta trayectoria (todo ello, con respecto a su normal de onda *OW*). Cada trayectoria sobre el cono es por lo tanto el resultado de una diferente dirección de vibración; la figura 9-12C, ligeramente aumentada, es una vista aérea del cono de rayos, que presenta la dirección de vibra-




FIGURA 9-12

**(A) Incidencia normal de un cilindro de luz no polarizada en una sección circular para producir un cono de rayos dentro del cristal (es decir, refracción cónica interna) y un cilindro hueco de rayos después de su salida. (B) Distribución cónica de los rayos (1, 2, 3, etc.) asociada con diferentes vibraciones en la sección cíclica ($\beta_1$, $\beta_2$, $\beta_3$, etc.) pero con la normal de onda común OW. (C) Visión esquemática de los rayos emergentes en la superficie superior del cristal, con unas pocas direcciones de vibración en los respectivos puntos de emergencia.**

ción de varios rayos en sus puntos de emergencia del cristal. Obsérvese su orientación con respecto a la traza del plano óptico. Los rayos 1 y 2 se desplazan en este plano del siguiente modo: el 1 actúa igual que un rayo *O* en un cristal uniáxico y el 2 igual que un rayo *E*.

Cuando la placa cristalina tiene poco espesor, el radio del cilindro hueco de luz emergente del cristal disminuye, llegando a ser mínimo para los granos cristalinos o para las placas (láminas) del espesor normalmente utilizado en óptica cristalográfica. Estas placas se comportan de modo análogo a las

secciones circulares de minerales uniáxicos (las cuales son incapaces de presentar refracción interna cónica). Así pues, un rayo de luz no polarizada, normalmente incidente, continúa sin polarizar durante su paso por estas placas, mientras que un rayo de luz polarizada conserva el mismo plano de vibración después de su entrada en el cristal.

## Incidencia oblicua

Sólo se va a discutir aquí un caso de incidencia oblicua —es decir aquella incidencia oblicua en la que el rayo incidente es paralelo a un plano principal de la indicatriz; la figura 9-13 es un ejemplo—. El rayo no polarizado *UO* incide oblicuamente en la base del cristal, la cual es un plano semigeneral *YX'*. Por lo tanto el plano de incidencia es el plano principal *XZ* (cuya prolongación sombreada se ha dibujado por debajo del cristal en la figura 9-13 para darle mayor énfasis). Las trayectorias de los rayos refractados resultantes están contenidas dentro de este plano principal. Uno de estos rayos, $OR_1$, vibra perpendicularmente al plano principal que contiene su trayectoria. Así actúa como un rayo *O*. En el ejemplo este rayo vibra paralelo a *OY* y está asociado con el índice de refracción $\beta$. Su trayectoria, por ser perpendicular a sus direcciones de vibración (por tanto coinciden con su normal de onda) cumple la ley de Snell; así pues:

$$\text{sen } r_1 = \frac{n_i}{\beta} \text{ sen } i$$

donde $n_i$ es el índice de refracción del medio que rodea al cristal; *i*, el ángulo de incidencia y $r_1$ el ángulo de refracción para el rayo $OR_1$ (fig. 9-13).

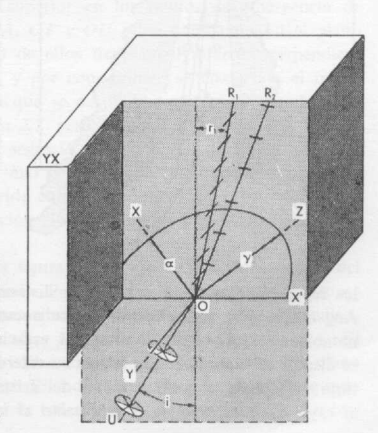



FIGURA 9-13

**Incidencia oblicua de UO, rayo no polarizado que se propaga paralelamente al plano XZ sobre un plano semigeneral X'Y. Una región del cristal ha sido cortada para ilustrar el caso. Las vibraciones para el rayo refractado OR, son paralelas a OY; las correspondientes al rayo OR₂ están contenidas dentro del plano XZ.**

La trayectoria $OR_2$ es más difícil de determinar. Actúa como un rayo $E$, no siendo mutuamente perpendiculares. Su trayectoria y dirección de vibración están contenidas dentro del plano principal al cual el rayo incidente es paralelo (el plano débilmente sombreado en la figura 9-13). La trayectoria, dirección de vibración e índice de refracción asociado con este rayo $E$ pueden determinarse adaptando el mismo método gráfico de construcción que se ha descrito en la página 104 (pasos 1 a 8).

## FIGURAS DE INTERFERENCIA BIÁXICA

Para ser coherentes —o sea, capaces de interferirse— dos rayos de luz deben: 1) originarse a partir del mismo haz incidente de luz polarizada antes de entrar en un cristal anisótropo, y 2) desplazarse según la misma trayectoria después de emerger del cristal. Si un cristal biáxico se ilumina con un cono de luz polarizada, los rayos que están casi juntos dentro del cono puede considerarse que se propagan paralelamente. Sean $a$ y $b$ en la figura 9-14

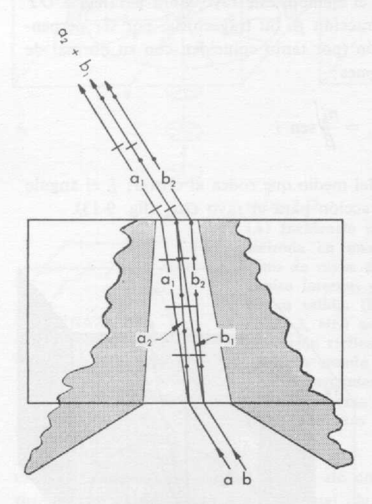



FIGURA 9-14

**Corte esquemático mostrando dos rayos a y b vecinos inmediatos, pertenecientes al cono de iluminación, su distancia ha sido enormemente exagerada para ilustrar la cuestión. Los rayos a y b después de entrar en el cristal anisótropo se escinden en los rayos $a_1$ y $a_2$ y $b_1$ $b_2$ respectivamente. Los rayos $a_2$ y $b_1$ emergen en el mismo punto del cristal y por consiguiente tienen la misma trayectoria en el aire, interfiriéndose mutuamente. El espesor del cristal ha sido enormemente exagerado.**

los representantes de tales rayos, la distancia $d$ entre ellos puede medirse en Ångstroms, pero para ilustrar mejor nuestro razonamiento se ha exagerado notablemente. Al entrar en el cristal, cada uno de los rayos incidentes, $a$ y $b$, se disocia en dos rayos que vibran en diferente dirección y se desplazan a distinta velocidad; el paso a través del cristal retrasa al rayo $a_2$ con respecto al rayo $a_1$, y al rayo $b_2$ con respecto al rayo $b_1$. Algunos rayos como $a_2$ y

$b_1$, cada uno de ellos de diferente rayo original, emergen en el mismo punto del cristal y, puesto que los rayos originales $a$ y $b$ eran esencialmente paralelos antes de entrar en el cristal, $a_2$ y $b_1$ se desplazarán con la misma trayectoria en el aire, además de interferirse.

Haremos intencionadamente un supuesto incorrecto tanto en la figura 9-15A como en la discusión que sigue, esto es, que los dos rayos que se interfieren mutuamente después de emerger, se han desplazado también con la misma trayectoria mientras atravesaban el cristal. Esto no es verdad; las trayectorias de $a_1$ y $b_1$, por ejemplo, no coinciden dentro del cristal de la figura 9-14. Ahora bien, dentro de los cristales de birrefringencia moderada, el ángulo entre las trayectorias tales como $a_2$ y $b_1$ es generalmente pequeño —de 1 a 3 grados aproximadamente—; de este modo, nuestro supuesto no está demasiado lejos de la verdad y simplifica considerablemente la siguiente discusión e ilustración.

## Figuras con la bisectriz aguda centrada

Supongamos un cono de luz, enfocado de tal modo, que su vértice $O$ esté en la superficie inferior de un cristal (fig. 9-15A). A partir de $O$ y hacia arriba, divergen numerosos rayos —algunos que se desplazan rápidamente, otros lentamente, según sus direcciones de vibración en el cristal—. De estas múltiples trayectorias, consideremos $OR$, $OP$, $OQ$, $OX$, $OS$, $OA$, $OT$ y $OU$ en cada una de las cuales se representa la trayectoria de los rayos lento y rápido —su separación angular de 1 a 3 grados es ignorada— que interfieren mutuamente después de emerger del cristal. Las direcciones de vibración de los rayos lentos y rápidos en cada trayectoria se han dibujado en el punto donde la trayectoria corta a la indicatriz y además son a la vez proyectadas ortográficamente en la superficie superior en los puntos de emergencia de los rayos. Puesto que $OX$, $OS$, $OA$, $OT$ y $OU$ están contenidos en el plano principal punteado $ZX$, cada uno de ellos tiene una vibración perpendicular a este plano dentro del cristal y por consiguiente asociado con el índice de refracción $\beta$. El segundo rayo que se desplaza según cada una de estas trayectorias vibra dentro del plano $XZ$ pero tangente a la indicatriz. Es decir, el índice de refracción para el segundo rayo es $\gamma$ para la trayectoria $OX$, $\gamma'$ para $OS$, $\alpha'$ para $OT$ y un valor más pequeño de $\alpha'$ para la trayectoria $OU$. Para la trayectoria $OA$, que coincide con el eje óptico, los rayos vibran paralelamente a los radios de la sección circular; así pues el único índice asociado con el rayo $OA$ es $\beta$.

Análogamente, $OQ$ y $OP$ en la figura 9-15A están contenidos dentro del plano principal débilmente sombreado. Por lo tanto, los rayos que se propagan en cada una de estas direcciones vibran paralelamente a $OZ$, perpendicular a este plano; por lo tanto el índice correspondiente a este rayo es $\gamma$. El segundo rayo, según cada una de estas direcciones, vibra dentro del plano pero tangencialmente a la indicatriz. El índice de refracción de este segundo rayo es $\alpha'$ para $OQ$ y el valor de $\alpha'$ es todavía más pequeño para $OP$. La tra-

yectoria *OR* representa el caso general ya que no está contenido dentro de ningún plano principal. El rayo rápido y el lento que se desplazan según ella, están asociados con las direcciones de vibración a las que corresponden los índices $\alpha'$ y $\gamma'$ respectivamente.

El retardo entre el rayo lento y el rápido cuando emergen del cristal por la superficie superior en la figura 9-15A depende de que el camino a través del cristal sea recto (como *OX*) o según una trayectoria que forme un ángulo $\theta$ con *OX*. El retardo entre los rayos lentos y rápidos que emergen en *OX* es

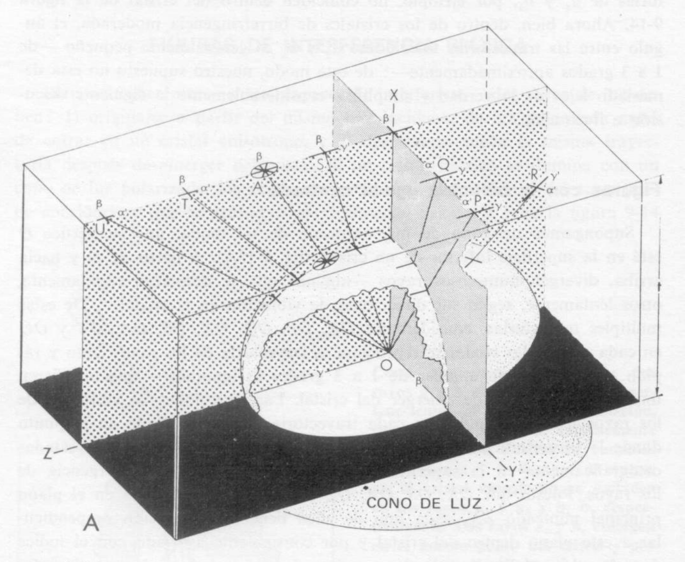



FIGURA 9-15 A

**Relación de algunas trayectorias seleccionadas OP, OQ, OR, OX, OS, OA, OT y OU con sus direcciones privilegiadas asociadas, mostrando cómo estas últimas son tangentes a la indicatriz (o proyectadas sobre la superficie superior del cristal en el punto de emergencia del rayo).**

igual a $(\gamma - \beta)\,t$ mientras que los dos rayos que suponemos se desplazan según *OS*, se distancian en $(\gamma' - \beta)\,(t/\cos\,\theta)$ aproximadamente. Nótese que el retardo disminuye hasta cero para las parejas de rayos rápido-lentos que se propagan según trayectorias dentro del abanico entre *OX* y *OU* al ir aproximándose a *OA*. Esto es porque el índice ($\gamma'$ o $\alpha'$) asociado con uno de los rayos de la pareja viene a igualarse con el valor del índice asociado con el otro miembro de la pareja, tanto más si la trayectoria se hace paralela a un eje óptico. Para las trayectorias que forman ángulos cada vez mayores con

*OA*, el orden de aumento de los retardos es mayor para aquellas trayectorias del abanico entre *OA* y *OU* que las del abanico entre *OA* y *OX*, ya que la longitud de la trayectoria aumenta desde *OA* hacia *OU*, mientras que disminuye desde *OA* hacia *OX*. El retardo aumenta en el más elevado grado en aquellas trayectorias contenidas desde *OX* hacia *OP*. Para tales trayectorias el retardo en el punto de emergencia es aproximadamente igual a $(\gamma - \alpha')$ $(t/\cos\theta)$, el valor de $(\gamma - \alpha')$ se va aproximando al de $(\gamma - \alpha)$ cuando $\theta$ va aumentando. Para las innumerables trayectorias generales que no están contenidas dentro de los planos principales —siendo *OR* un ejemplo— el retardo aumenta tanto más cuando mayor es el ángulo que forma con el eje óptico más cercano.

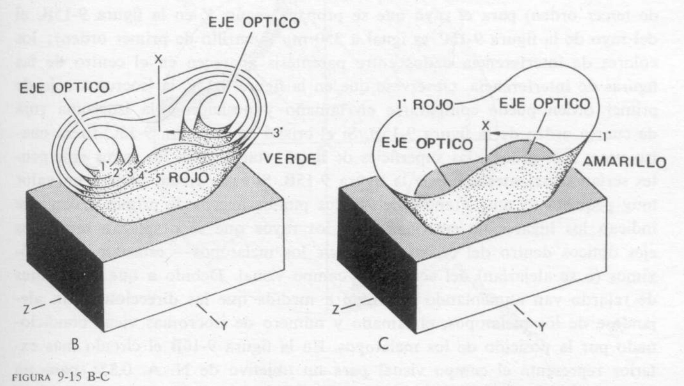



FIGURA 9-15 B-C

**(B) Superficies de igual retardo sobre un cristal de moderada a alta birrefringencia. (C) Lo mismo para un cristal de baja birrefringencia.**

**Superficies de igual retardo; isocromas.** Las superficies que unen todos los rayos adyacentes que emergen del cristal con el mismo retardo se conocen como *superficies de igual retardo* o como superficies de Bertin. En la figura 9-15B han sido dibujadas las correspondientes a los retardos de 550, 1100, 1650, 2200 y 2750 m$\mu$. La intersección entre estas superficies y un plano horizontal paralelo a la superficie superior del cristal, presenta un ejemplo de isocromas visibles en una figura de interferencia biáxica, en la que los rayos que se desplazan según la bisectriz aguda emergen en el centro del campo visual; a este tipo de figura de interferencia se le llama figura de la bisectriz aguda centrada. Si la iluminación es con luz blanca, estas intersecciones están materializadas por isocromas rojas de primero, segundo, tercero, cuarto y quinto orden. Si la luz monocromática de 550 m$\mu$ de longitud de onda sustituye a la anterior, aparecen áreas negras de extinción donde antes estaban las rojas. A medio camino, aproximadamente, entre estos tra-

zos negros, pueden verse áreas brillantes de luz de longitud de onda 550 m$\mu$ (verde).

El número y disposición de las isocromas vistas en una figura de bisectriz aguda dependen: 1) del espesor del cristal $t$; 2) de la diferencia entre los índices de refracción de los rayos lentos y rápidos que se desplazan hacia arriba según la bisectriz aguda —es decir ($\beta - \alpha$) en los cristales positivos y ($\gamma - \beta$) en los negativos—; 3) el valor de $2E$, y 4) la abertura numérica del objetivo que se haya usado. Las figuras 9-15B y C presentan dos placas de igual espesor de dos minerales diferentes con valores parecidos de $2E$, pero que difieren considerablemente en el valor ($\gamma - \beta$); este valor para el cristal de la figura 9-15C viene a ser un cuarto del que tiene el cristal de la figura 9-15B. En consecuencia, si el retardo $t(\gamma - \beta)$ es igual a 1400 m$\mu$ (verde de tercer orden) para el rayo que se propaga según $X$ en la figura 9-15B, el del rayo de la figura 9-15C es igual a 350 m$\mu$ (amarillo de primer orden); los colores de interferencia dados entre paréntesis aparecen en el centro de las figuras de interferencia. Obsérvese que en la figura 9-15C la isocroma roja de primer orden puede compararse en tamaño y posición a la isocroma roja de cuarto orden de la figura 9-15B. Si el cristal en la figura 9-15C fuera cuatro veces más grueso, las superficies de igual retardo para los rayos emergentes serían semejantes a las de la figura 9-15B. Si cada cristal tuviera un valor muy pequeño (o muy grande) de $2E$, los puntos negros de primer orden que indican los lugares de emergencia de los rayos que se desplazan según los ejes ópticos dentro del cristal —es decir los melatopos— estarían muy próximos (o se alejarían) del centro del campo visual. Debido a que los colores de retardo van aumentando de orden a medida que las direcciones van alejándose de los melatopos, el tamaño y número de isocromas viene condicionado por la posición de los melatopos. En la figura 9-16B el círculo más exterior representa el campo visual para un objetivo de N. A. 0,85; para un objetivo de N. A. 0,65, solamente sería visible la porción de la figura que queda dentro de la circunferencia de trazos.

La proyección ortográfica de las direcciones privilegiadas de las trayectorias de los rayos que emergen en el campo visual de una figura de interferencia, puede determinarse, de un modo aproximado, por una aplicación bidimensional de la regla de Biot-Fresnel. Por ejemplo, en la figura 9-16A, las líneas de trazos se han dibujado desde el punto $a$ a cada melatopo; las direcciones de vibración proyectadas ortográficamente para el punto $a$ son las bisectrices de los ángulos entre las dos líneas de trazos.

**Isogiras.** El tamaño y distribución de las áreas de extinción —o sea las isogiras— en una figura de interferencia dependen de la distribución dentro del campo visual de los rayos para los cuales sus direcciones privilegiadas, proyectadas ortográficamente, son N-S o muy próximas. Utilizada la regla de Biot-Fresnel, tales puntos de emergencia podrían ser localizados en la figura 9-16A; su distribución tomaría la forma de una hipérbola cuyos vértices coincidirían con los melatopos. Suponiendo un polarizador vibrando N-S, sólo los rayos que vibran N-S pueden emerger en los puntos; en consecuencia, las direcciones privilegiadas E-O en la figura 9-16A han sido dibujadas a

trazos para indicar la ausencia del rayo de luz que vibra según esa dirección *E-O*. Por lo tanto, ya que la figura de interferencia se ve con el analizador insertado, que polariza E-O, estas áreas hiperbólicas serán regiones de extinción y aparecerán como bandas negras.

Si se hace girar la platina del microscopio que soporta al cristal mientras se observa la figura de interferencia, el tamaño y la localización de las isogiras cambia drásticamente, mientras que la imagen de las isocromas únicamente gira simultáneamente con la platina, y su forma permanece constante.

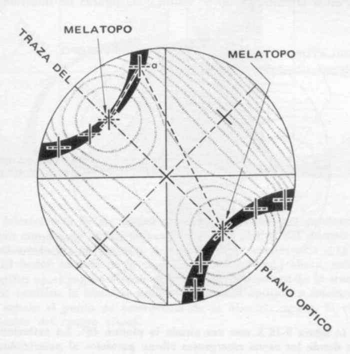



FIGURA 9-16 A

**Figura de la bisectriz aguda centrada, a 45° de la posición de extinción. El análogo bidimensional de la ley de Biot Fresnel se aplica al punto a para determinar (aproximadamente) las direcciones privilegiadas de los rayos que emergen allí. En varios puntos del campo visual se presentan las direcciones privilegiadas para los rayos emergentes.**

La figura 9-16B presenta el aspecto de la figura de interferencia de la figura 9-16A después que la platina del microscopio giró de tal modo que el plano óptico del cristal se orientó E-O. La regla de Biol-Fresnel puede nuevamente utilizarse para localizar los puntos de emergencia de los rayos asociados con las direcciones privilegiadas N-S y E-O; en la figura puede verse una construcción representativa. Las isogiras tienen ahora la forma de una cruz. Generalmente, la barra (brazo) delgada de esta cruz coincide con la traza del plano óptico dentro de la figura de interferencia; el brazo más grueso señala la traza del plano principal que contiene la bisectriz aguda y la normal óptica.

En general, en figuras de interferencia biáxica siempre que el cristal gire de tal modo que la traza del plano principal dentro del campo visual sea

paralela al hilo del retículo según la dirección N-S o E-O, se desarrolla una isogira más o menos recta a lo largo de este trazo. Siempre que una isogira penetra en la intersección del retículo, el cristal ha sido girado a una posición de extinción (si se le observa bajo condiciones ortoscópicas).

**Cristal con 2*V* grande.** Dibújese concéntrico con el círculo que limita el campo visual en las figuras 9-16A y B, un círculo con la mitad de su radio (del campo visual). Suponiendo que estos dos pequeños círculos sean el borde del campo visual (o sea, la parte de la figura de interferencia de la periferia a partir de estos círculos ya no es visible), las figuras de interferencia dentro

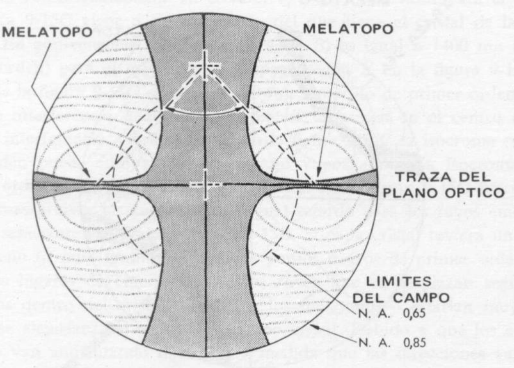



FIGURA 9-16 B

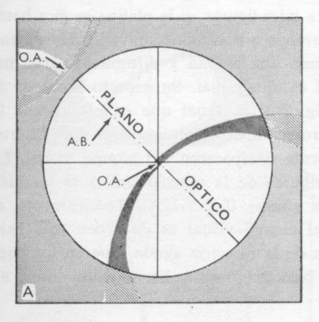
**Aspecto de la figura 9-16 A una vez girada la platina 45°. La extinción se produce en las áreas donde los rayos emergentes vibran paralelos al polarizador. El círculo de trazos señala el límite del campo visual cuando se usa un objetivo de N. A. 0,65 en lugar de N. A. 0,85.**

de ellos representan las de un cristal cuyo ángulo 2*E* es tan grande que los ejes ópticos no emergen en el campo visual. A pesar de que los melatopos no aparecen dentro del campo visual, la traza del plano óptico puede localizarse: 1) a partir del aspecto característico de las isocromas, o 2) localizando la barra más delgada de la cruz formada cuando la traza del plano óptico es E-O o N-S (por ejemplo: fig. 9-16B).

## Figuras con el eje óptico centrado

Los cristales orientados con un eje óptico vertical —o sea, normal al plano de la platina— dan figuras de interferencia en las cuales este eje óptico emerge como un melatopo en el centro del campo visual (fig. 9-17). El segundo eje óptico emergerá a una distancia variable, fuera del centro del campo, dependiendo del valor de 2*E* del mineral; en el ejemplo (fig. 9-17A), el segun-

do eje óptico emerge cerca del campo visual. La línea de trazos en la figura 9-17A representa la traza del plano óptico. Según esta traza, se localiza el punto de emergencia de la bisectriz aguda, la cual está siempre en el lado convexo de la isogira; el punto de emergencia de la bisectriz obtusa (no dibujada) está siempre en el lado cóncavo de la isogira.



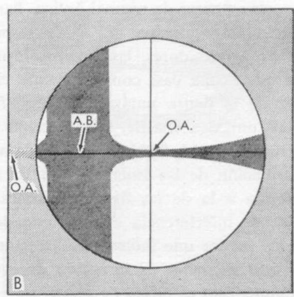




FIGURA 9-17

**Figuras de interferencia de eje óptico centrado. El cristal que produce esta figura está orientado con un eje óptico perpendicular a la platina del microscopio (y con su plano óptico NO-SE). (B) Aspecto de esta figura de interferencia si la platina gira 45 grados. El brazo delgado de la cruz que se ha formado ahora, señala la traza del plano óptico en el campo visual; el brazo más grueso señala la traza del plano principal que contiene la bisectriz aguda y la normal óptica. La intersección de los dos brazos señala el punto de emergencia de la bisectriz aguda, la cual, en este caso, cae dentro del campo visual.**

La rotación del cristal mediante el giro de la platina del microscopio hace que la isogira de la figura 9-17A gire en torno al melatopo como si fuera un eje. No obstante, cuando el plano óptico del cristal se coloca en la dirección E-O o N-S, se forma una cruz cuya barra más delgada permite localizar el plano óptico (fig. 9-17B). La intersección de las líneas centrales de las barras gruesas y delgadas de esta cruz señala la emergencia de la bisectriz aguda dentro del campo. Si la bisectriz aguda no emerge dentro del campo, ninguna cruz se formará dentro de él.

## Figuras con la bisectriz obtusa centrada

Los cristales biáxicos rotos o cortados perpendicularmente por una bisectriz obtusa dan figuras de interferencia, en el centro de las cuales emerge la bisectriz obtusa. Tales figuras se parecen a las correspondientes a la bisectriz aguda para minerales con grandes valores de $2V$ (véase pág. 198); hasta el aspecto de sus isocromas es semejante. Su diferencia será tratada en la página 202.

## Figuras de la normal óptica

Los cristales orientados en la platina del microscopio de tal modo que *Y*, dirección de su normal óptica, esté vertical —o sea, perpendicular a la platina— dan figuras de normal óptica. Para tales figuras, si la platina se gira hasta que un plano principal (*ZY* o *X*) sea paralelo a la dirección privilegiada de uno de los polarizadores, las isogiras forman una amplia y difuminada cruz negra que ocupa casi completamente el campo visual. Su aspecto recuerda la cruz de la figura uniáxica «flash» (fig. 7-21C). Igual que en el caso de la figura uniáxica «flash», una pequeña rotación de la platina hace que la cruz se rompa en hipérbolas que rápidamente desaparecen del campo visual. La distribución de las isocromas en las figuras de la normal óptica es también parecida a la de las figuras uniáxicas «flash» (fig. 7-22A). Teóricamente, el color de interferencia en el borde del campo visual es de orden más bajo en los puntos que indican la dirección de la bisectriz aguda, que en los puntos que señalaban la dirección de la bisectriz obtusa. En muchos casos, no obstante, esto es difícil de observar.

## Figuras semigenerales

Una platina semigeneral fue definida (pág. 185) como la cortada paralelamente a uno de los tres ejes principales de vibración, *X*, *Y*, *Z*. Tal placa es necesariamente perpendicular al plano principal que contiene a los dos ejes principales restantes. Por ejemplo, las superficies superior e inferior débilmente sombreadas del cristal de la figura 9-18 fueron cortadas paralelamente a *OY* y en consecuencia son perpendiculares al plano principal (punteado) *ZX*. Por lo tanto en la figura de interferencia de este cristal, la traza de este plano principal contiene la intersección de los hilos del retículo. Esta traza (de línea discontinua en la figura 9-18) divide a la figura de interferencia en dos imágenes reflejadas, propiedad que permite reconocer la traza de un plano principal dentro de una figura de interferencia biáxica. Para una sección semiparticular, la traza de un plano principal dentro del campo visual puede determinarse de un modo más o menos preciso girando la platina hasta que una isogira llegue a ser recta y paralela a uno de los hilos del retículo. El hilo coincide entonces con la traza de este plano principal —por ejemplo, el hilo E-O en la figura 9-18B.

## Figuras generales

Un corte según un plano principal de un cristal biáxico es perpendicular a los dos restantes planos principales. Un plano semigeneral lo es sólo a uno de los tres planos principales. La figura de interferencia de un cristal que se apoya en un plano principal se caracteriza porque por la intersección de los

hilos del retículo pasan las trazas de los dos planos principales; cuando se trata de la figura de un plano semigeneral, sólo puede observarse la traza de un plano principal atravesando la intersección de los hilos del retículo

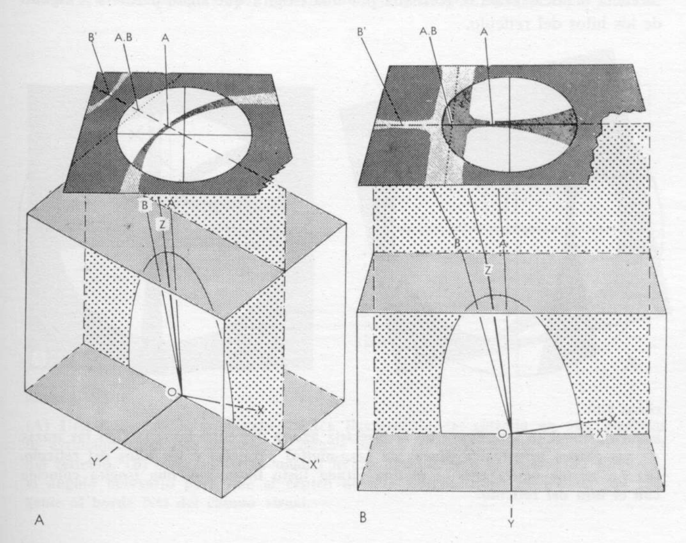



FIGURA 9-18

**(A) Figura de interferencia para un grano apoyado sobre una sección semigeneral X'Y (sombreada). El cono de luz que lo atraviesa y emerge del cristal no ha sido dibujado. Los rayos de luz del cono que se propagan según los ejes ópticos OA y OB dentro del cristal toman las trayectorias AA′ y BB′ después de emerger en el aire. El plano principal XZ (punteado) está a 45° de la dirección privilegiada del polarizador. (B) El plano principal ZX está a 90 grados de la dirección privilegiada del polarizador.**

(figura 9-18). Un plano general, por contraste, no es paralelo a los ejes *X*, *Y* o *Z* y por tanto no es perpendicular a ninguno de los tres planos principales. Así pues, en la figura de interferencia que se obtiene de un plano general no se observa la traza de ningún plano principal que pase por la intersección de los hilos del retículo.

Las trazas de los planos principales pueden aparecer o no en la figura de interferencia de un grano que se apoya en un plano general. Si lo hacen, presentan unas isogiras más o menos rectas cuando el cristal gira hasta que aquellas trazas quedan paralelas al retículo (fig. 9-19A). Para esta posición de la platina, si las dos trazas principales aparecen en el campo (como en la figura 9-19A), las isogiras forman una cruz cuyo centro señala el punto

de emergencia del eje principal $X$ o $Z$. Si la platina se gira hasta que la isogira pasa por el centro del retículo (fig. 9-19B) —con lo cual el cristal estará en una posición de extinción— podrá reconocerse una típica figura de interferencia biáxica, general, formada por una isogira que sigue paralela a alguno de los hilos del retículo.

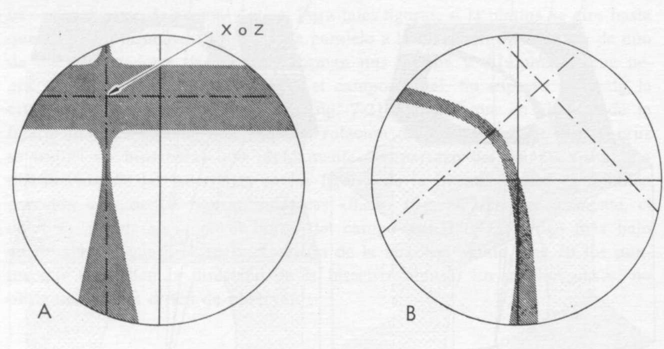



FIGURA 9-19

**Figura general (o sea, figura de la bisectriz aguda descentrada). (A) Con las trazas de sus planos principales (líneas de raya-punto) paralelas a los hilos del retículo. (B) La misma figura con la platina girada justo hasta que una isogira coincide con el hilo del retículo.**

## Diferenciación de las figuras de interferencia

No siempre pueden distinguirse las diferentes figuras de interferencia que representan diferentes orientaciones de un cristal biáxico. Por ejemplo, si $2V$ es grande para el cristal, podrá confundirse la bisectriz aguda centrada con la bisectriz obtusa. La última figura puede también confundirse con una figura de la normal óptica. La distinción entre esas figuras puede algunas veces hacerse determinando $\delta$, ángulo de rotación de la platina, necesario para que las isogiras pasen desde la posición de extinción (fig. 9-20A) hasta que la línea central que recorre la hipérbola sombreada (a trazos en la figura 9-20B) sea tangente al borde del campo visual. Sean $\delta_{NW}$, $\delta_{SW}$, $\delta_{SE}$ y $\delta_{NE}$ los ángulos de rotación de la platina, necesarios para producir tal tangencia en los bordes de los cuadrantes NW, SW, SE y NE del campo visual, respectivamente. Por ejemplo, para pasar de la figura de interferencia 9-20A a la 9-20B se precisa realizar un giro en sentido de las agujas del reloj de ángulo $\delta_{NW}$. Obsérvese que si la rotación en el sentido de las agujas del reloj hubiese rebasado ligeramente el ángulo $\delta_{NW}$, la línea central de la isogira hiperbólica inferior (sombreada en la figura 9-20B) se haría tangente al borde del cuadrante SE; de este modo $\delta_{SE}$ es mayor que $\delta_{NW}$. Análogamente, giros preci-

sos a partir de la posición de extinción de la figura 9-20A permitirán medir los de $\delta_{SW}$ y $\delta_{NE}$. Estos cuatro ángulos —$\delta_{SE}$, $\delta_{NW}$, $\delta_{SW}$ y $\delta_{NE}$— son iguales únicamente en el caso de las figuras de interferencia perfectamente concentradas; o sea, aquellas para las que un eje principal emerge en la intersec-

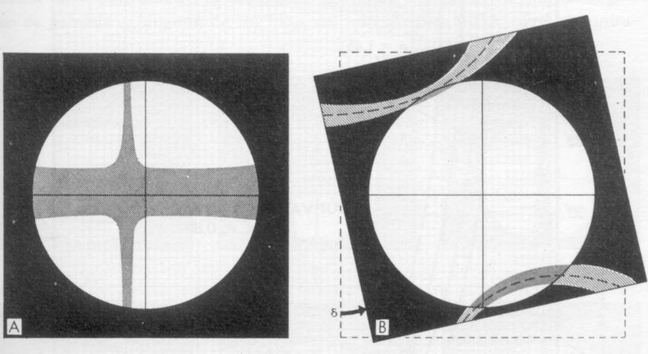



FIGURA 9-20 A-B

**(A) Una figura de interferencia biáxica ligeramente descentrada en una posición de extinción. Para esta posición la isogira pasa a través de la intersección del hilo del retículo. (B) Aspecto de la misma figura después que la platina ha girado δ, el ángulo necesario para que el centro de una isogira (línea de trazos) sea tangente al borde NO del campo visual.**

ción de los hilos del retículo. Sin embargo, aun en el caso de figuras ligeramente descentradas, δ —la media de esos cuatro ángulos— permite determinar $V$ cuando se usan las curvas (fig. 9-20C) desarrolladas por Kamb (1958), donde $V$ representa el ángulo (dentro del cristal) entre el eje principal centrado (o casi centrado) y el eje óptico. Para decidir qué curva de la figura 9-20C debe usarse, es necesario conocer el valor aproximado de $\beta$ para el problema y observar la figura de interferencia con un objetivo de apertura numérica 0,85. El eje principal que emerge en el centro del campo visual es por tanto: 1) la bisectriz aguda, si $V$ es menor de 45°; 2) la bisectriz obtusa, si $V$ rebasa los 45°, y 3) la normal óptica, si δ es tan pequeño que una línea horizontal trazada desde el punto que le representa en el eje de coordenadas, cae por debajo de la curva. La posición con la que puede determinarse $2V$ por este método depende en parte del grado en que la figura de interferencia observada esté centrada.

Algunas figuras de interferencia biáxicas pueden confundirse con las figuras uniáxicas, pero éstas pueden diferenciarse definitivamente. Las figuras de interferencia biáxicas, en las que un eje óptico aparece dentro del campo visual, se diferencian fácilmente, en general, de las figuras uniáxicas. Las figuras de la bisectriz aguda centrada de minerales con $2V$ muy pequeño (1 ó

2 grados), son difíciles de diferenciar de las figuras uniáxicas, ya que la separación de los melatopos, que ocurre cuando el plano de los ejes ópticos está en la posición de 45 grados, se observa con dificultad. Esta separación

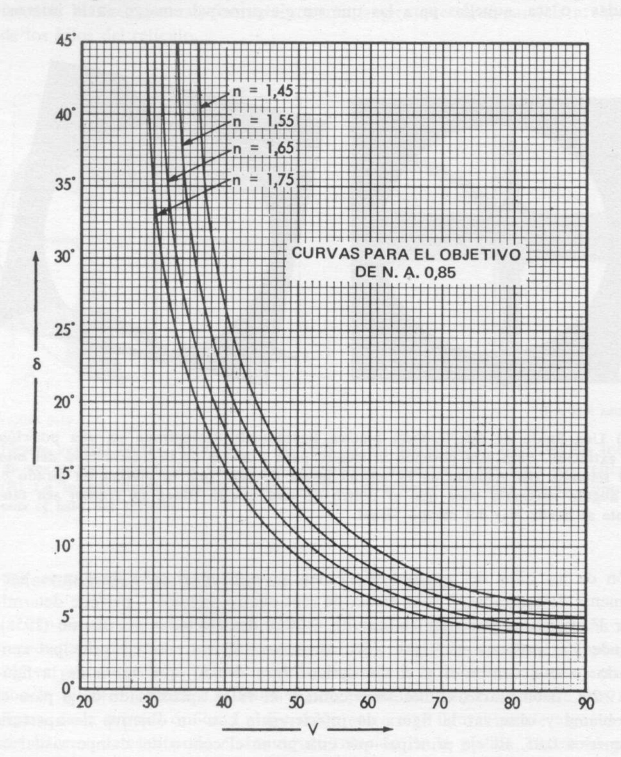



FIGURA 9-20 C

**Diagrama para determinar V ángulo entre la bisectriz emergente en el centro del campo visual y un eje óptico, si previamente el valor de δ ha sido medido en una figura de interferencia centrada, vista con un objetivo de N. A. 0,85.** (Datos de Kamb, 1958.)

puede observarse mejor, suponiendo que el grano sea suficientemente grande, sustituyendo el objetivo de aumento medio (10x, N. A. 0,25) por el objetivo de gran aumento y así obtener una vista ampliada del centro de la figura de interferencia.

Cuando el eje óptico no aparece dentro del campo visual, un cristal biá-

xico con $2V$ pequeño puede ser confundido y no distinguirse de uno uniáxico (fig. 9-21). Ahora bien, algunas figuras de interferencia, aunque no tengan ningún eje óptico dentro del campo, se diferencian fácilmente girando la platina hasta que una isogira pasa a través del centro del retículo. En esta posición un cristal biáxico se distinguirá de modo indudable ya que la isogira no es paralela a ninguno de los hilos del retículo (fig. 9-22A). Por el contra-

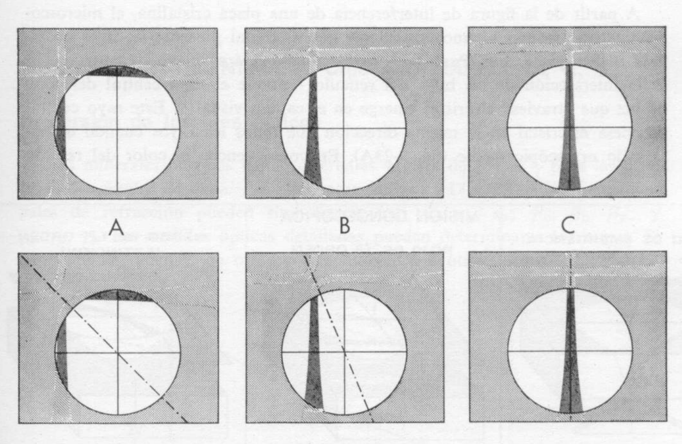



FIGURA 9-21

**Analogía entre una figura uniáxica descentrada (diagramas superiores) y una figura biáxica con 2V pequeño (diagramas inferiores) para el cristal (A) a 45° de la posición de extinción, (B) a 22° de la extinción y (C) en la extinción.**

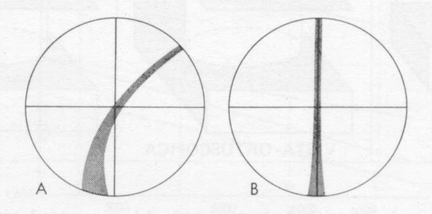



FIGURA 9-22

**Comparación de la forma y disposición de las dos isogiras después que la platina ha sido girada hasta que la figura atraviesa la intersección del hilo del retículo. (A) Isogira biáxica inequívoca, caracterizada por su forma curvada y su no paralelismo con el hilo del retículo. (B) Isogira que puede representar o bien un cristal uniáxico o bien una sección semigeneral de un cristal biáxico. Obsérvese su bisección longitudinal por el hilo N-S del retículo.**

rio, una isogira que queda bisecada longitudinalmente para un retículo (figura 9-22B) puede indicar que se trata de un cristal uniáxico o de un biáxico apoyado encima de una sección semigeneral.

## Relación con las observaciones ortoscópicas

A partir de la figura de interferencia de una placa cristalina, el microscopista puede deducir algunos caracteres que el cristal presentaría, si se observase ortoscópicamente. Para tales deducciones, el área clave de observación es la intersección de los hilos del retículo —donde el rayo central del cono de luz que atraviesa el cristal emerge en el campo visual—. Este rayo central atraviesa el cristal en la misma dirección que *todos* los rayos cuando es observado ortoscópicamente (fig. 9-23A). En consecuencia, el color del retardo

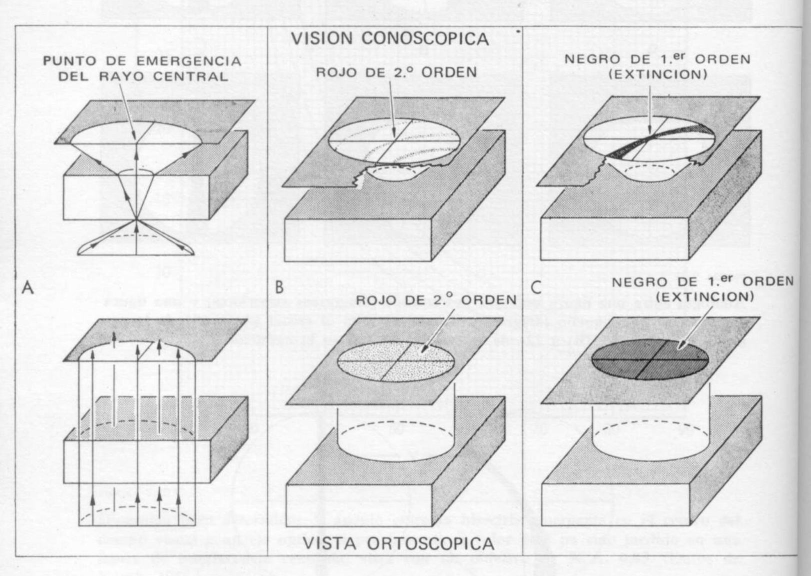



FIGURA 9-23

**(A) Identidad en la dirección de la trayectoria del rayo central con iluminación conoscópica (arriba), con todas las trayectorias de la iluminación ortoscópica (abajo). (B) Identificación del color de interferencia en la isocroma que pasa a través de la intersección reticular en la figura de interferencia (superior), con el color de interferencia presentado por todo el campo cuando la placa se observa ortoscópicamente (abajo). (C) Aspecto de una isogira que atraviesa el cruce reticular (arriba) lo que significa que todo el cristal está en extinción cuando se ve ortoscópicamente (abajo).**

presentado por la isocroma de la figura de interferencia que pasa a través de la intersección de los hilos del retículo es también el color del retardo de la placa cristalina (exceptuando los bordes irregulares) que se vería ortoscópicamente (fig. 9-23B). Análogamente, el cristal está en una posición de extinción ortoscópica cuando una isogira atraviesa el centro del retículo (figura 9-23C).

## DISPERSIÓN Y ORIENTACIÓN CRISTALOGRÁFICA DE X, Y y Z

### Dispersión de los ejes ópticos

Los minerales biáxicos tienen diferentes valores de $\alpha$, $\beta$ y $\gamma$ para las diferentes longitudes de onda. Así pues, para la luz C, D y F, los índices principales de refracción pueden simbolizarse así: $\alpha_C$, $\alpha_D$, $\alpha_F$; $\beta_C$, $\beta_D$, $\beta_F$; y $\gamma_C$, $\gamma_D$, $\gamma_F$. En medidas ópticas detalladas pueden determinarse los nueve. Si estos índices, además de otros correspondientes a otras longitudes de onda,

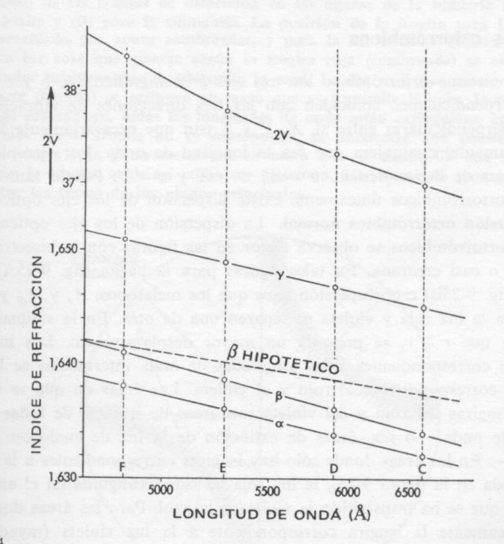



FIGURA 9-24

**Cambio en el valor de $\alpha$, $\beta$ y $\gamma$, así como de 2V con las diferentes longitudes de onda en la barita.** (Basado en los datos de Winchell, 1931.) **Si $\beta$ variase como indica la línea de trazos denominada «$\beta$ hipotética», el aspecto de la curva 2V estaría invertido y el ángulo $2V_C$ entonces sería mayor que $2V_F$.**

se proyectan en la gráfica de dispersión de Hartmann, se obtienen líneas generalmente rectas (fig. 9-24). Para la barita, tal como se ve en la figura 9-24, el valor de $\beta$ se aproxima tanto más al de $\alpha$ cuanto mayor es la longitud de onda. En consecuencia el $2V$ de la barita disminuye con las grandes longitudes de onda. Por lo tanto $2V_r$ es menor que $2V_v$, donde los subíndices $r$ y $v$ representan luz roja y violeta respectivamente (los extremos opuestos del espectro visible). La precedente desigualdad se abrevia generalmente diciendo: $r < v$. Si por el contrario, el valor de $\beta$ se va separando del de $\alpha$ con las grandes longitudes de onda (línea a trazos hipotética), $2V$ se incrementa también; tal situación se describe así: $r > v$. En los cristales biáxicos, los ejes ópticos no mantienen una posición constante para todas las longitudes de onda de la luz. El grado de su dispersión está expresado en el descenso de la curva de $2V$ en la figura 9-24. Según la diferencia existente entre $r$ y $v$ la dispersión de los ejes ópticos se calificará como débil, moderada o fuerte. Naturalmente, si $r$ es igual a $v$ no existe dispersión. Todos los cristales de barita presentan dispersión débil, con $r < v$; los de sillimanita presentan una fuerte dispersión, con $r > v$. El valor de la dispersión permite por lo tanto identificar un mineral.

## Cristales ortorrómbicos

En el sistema ortorrómbico los tres ejes cristalográficos, *a*, *b* y *c*, mutuamente perpendiculares, coinciden con las tres direcciones de vibración principales, perpendiculares entre sí, $X$, $Y$ y $Z$ (sin que necesariamente lo hagan respectivamente) cualquiera que sea la longitud de onda. Por ejemplo, todos los cristales de barita tienen: $a = Z$; $b = X$ y $c = Y$. Por lo tanto, en los cristales ortorrómbicos únicamente existe dispersión de los ejes ópticos.

**Dispersión ortorrómbica normal**. La dispersión de los ejes ópticos en los cristales ortorrómbicos se observa mejor en las figuras con la bisectriz aguda centrada o casi centrada. En tales figuras para la barita (fig. 9-25A) y sillimanita (fig. 9-25B) esta dispersión hace que los melatopos, $A_r$ y $A_v$, y las isogiras para la luz roja y violeta se separen una de otra. En la sillimanita, comoquiera que $r \gg v$, se presenta un mayor desplazamiento. Los melatopos e isogiras correspondientes a las longitudes de onda intermedias se localizan entre las correspondientes al rojo y al violeta. Las áreas en que se sobreponen las isogiras del rojo y del violeta son áreas de isogiras de todas las longitudes de onda —o sea, áreas de extinción de la luz de cualquier longitud de onda—. En las áreas donde sólo hay isogiras correspondientes a la luz roja (sombreada en la figura 9-25), la luz roja ha sido extinguida en el analizador mientras que se ha transmitido la violeta o la azul. Para las áreas donde aparece únicamente la isogira correspondiente a la luz violeta (rayada en la figura 9-25) se ha extinguido la luz violeta o azul en el analizador, en tanto que se ha transmitido la roja. En consecuencia, dentro de las figuras de interferencia de cristales que presentan una mínima o débil dispersión de los ejes ópticos, la isogira negra está ribeteada —especialmente en la región del

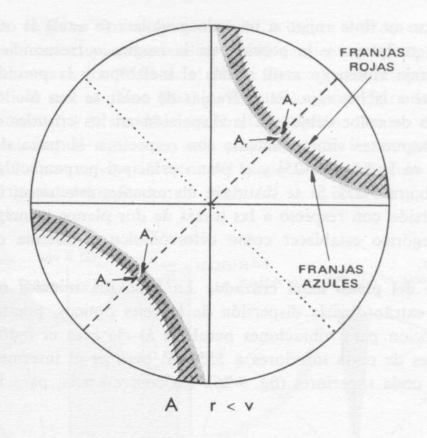
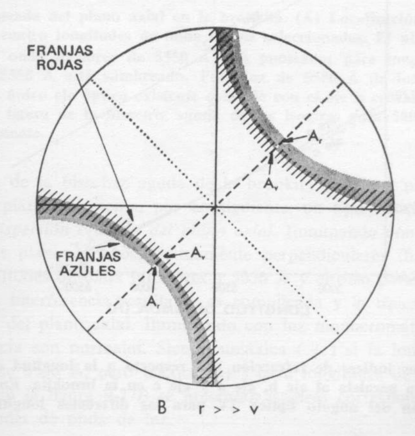



FIGURA 9-25

**Fundamento de las franjas de dispersión en las figuras de la bisectriz aguda (A) para la barita y (B) para la silimanita. La posición de la isogira para la luz roja está representada por zonas sombreadas, y para la luz azul se utilizan áreas rayadas. La luz roja que emerge según la isogira roja (sombreada) se extingue en el analizador mientras que se transmite la azul. La luz azul que emerge según la isogira azul (rayada) se extingue en tanto que se transmite la roja. Donde ambas isogiras se superponen, todas las longitudes de onda están extinguidas, apareciendo negras tales áreas. Donde no se superponen, se desarrolla una coloración azul según la isogira roja y un melatopo, en tanto que se desarrolla una coloración roja según la isogira azul, así como un melatopo. Las líneas de puntos y trazos representan las trazas de los planos principales.**



melatopo— por un tinte rojizo a un lado y violeta (o azul) al otro. El ribete rojo señala el melatopo y la porción de la isogira correspondiente a la luz violeta; la franja violeta (o azul) señala el melatopo y la porción de isogira correspondiente a la luz roja. Estas franjas de color se ven fácilmente.

Las franjas de color debidas a la dispersión en los cristales rómbicos están siempre dispuestas simétricamente con respecto a la traza del plano óptico (a trazos en la figura 9-25) y el plano principal perpendicular a él (punteado en la figura 9-25). Si se distingue claramente, esta simetría de los colores de dispersión con respecto a las trazas de *dos* planos principales permite de modo categórico establecer como ortorrómbico el sistema cristalino del cristal biáxico.

**Dispersión del plano axial cruzado.** La brookita, mineral ortorrómbico, presenta una extraordinaria dispersión de los ejes ópticos, puesto que su índice de refracción para vibraciones paralelas al eje *c* es el índice menor ($\alpha$) para longitudes de onda inferiores a 5550 Å, pero es el intermedio ($\beta$) para longitudes de onda superiores (fig. 9-26). En consecuencia, para longitudes de

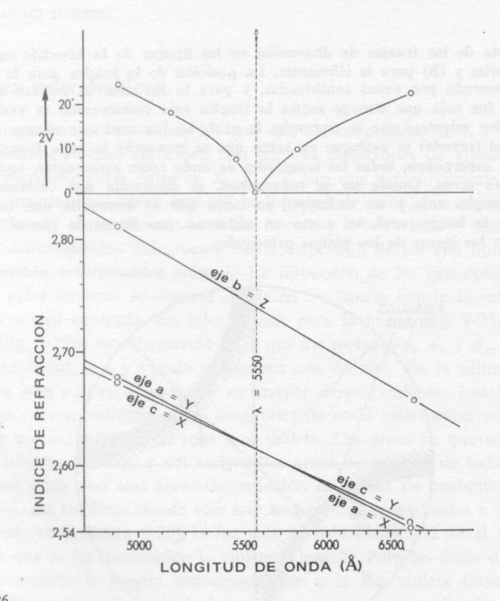



FIGURA 9-26

**Variación de los índices de refracción con respecto a la longitud de onda, para la luz que vibra paralela al eje b, eje a y eje c en la brookita. En la escala superior: variación del ángulo óptico 2V para las diferentes longitudes de onda de la luz.**

onda internas, el plano óptico (punteado en la figura 9-27A) es paralelo a los ejes *b* y *c* —o sea al plano cristalino (100)— mientras que para longitudes de onda superiores a los 5550 Å el plano óptico (sombreado) es paralelo a los ejes *a* y *b* —o sea, al plano (001)—. Para la longitud de onda de 5550 Å el cristal es uniáxico ( + ), siendo el eje *b* el eje óptico. Dentro del plano punteado (100), el ángulo óptico es más pequeño para las longitudes de onda grandes; por lo tanto $r < v$. Dentro del plano (001), el ángulo óptico es mayor para las grandes longitudes de onda (cf. $\lambda = 6500$ Å y $\lambda = 6000$ Å); es decir $r > v$.

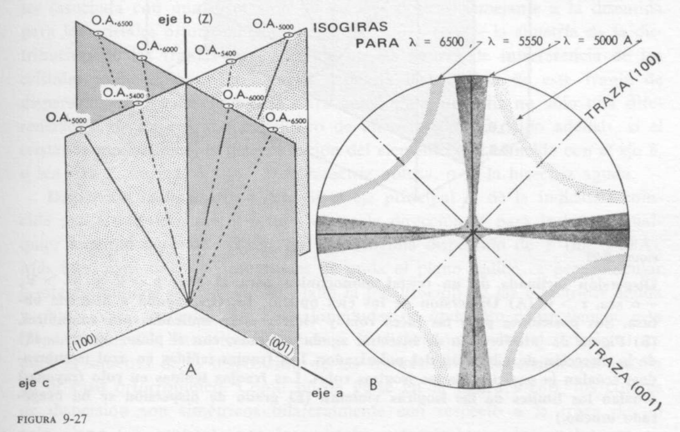



FIGURA 9-27

**Dispersión cruzada del plano axial en la brookita. (A) Localización del eje óptico (O.A. ) para cuatro longitudes de onda de luz seleccionadas. El plano óptico para longitudes de onda menores de 5550 Å está punteado; para longitudes de onda superiores a 5550 Å está sombreado. Para luz de 5550 Å de longitud de onda, 2V es cero, el único eje óptico existente coincide con el eje b cristalográfico. (B) Situación en la figura de la bisectriz aguda de las isogiras para 5000 Å, 5550 Å y 6500 Å únicamente.**

La figura de la bisectriz aguda de la brookita (el eje *b* perpendicular al plano de la platina) presenta, por consiguiente, un tipo de dispersión conocido como *dispersión cruzada del plano axial.* Iluminando con luz blanca, se producen dos planos ópticos, mutuamente perpendiculares (fig. 9-27B), uno para las longitudes de onda inferiores a 5550 Å y el otro para las superiores. La figura de interferencia resultante es complicada y la típica de la dispersión cruzada del plano axial. Iluminando con luz monocromática, las figuras de interferencia son normales. Siendo uniáxica ( + ) si la longitud de onda utilizada es de 5550 Å, pero biáxica ( + ) para longitudes de onda mayores o menores. En la figura 9-27B se presentan isogiras correspondientes a unas pocas longitudes de onda de luz.

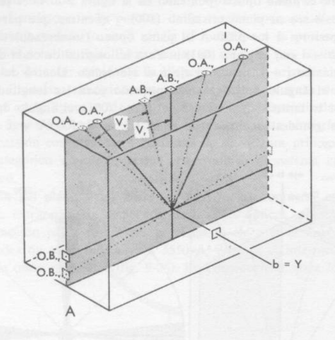
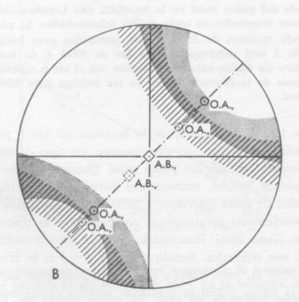



FIGURA 9-28

**Dispersión inclinada de un cristal monoclínico para el cual b = Y y $V_r > V_v$ —o sea, r > v. (A) Dispersión de los ejes ópticos, bisectriz aguda y bisectriz obtusa. Sus posiciones para las luces roja y violeta están indicadas por subíndices. (B) Figura de interferencia de bisectriz aguda centrada, con el plano óptico a 45° de la dirección de vibración del polarizador. Las franjas teñidas en azul (sombreadas) señalan la posición de las isogiras rojas. Las franjas teñidas en rojo (rayadas) señalan los límites de las isogiras violetas. (El grado de dispersión se ha exagerado mucho.)**



## Cristales monoclínicos

En los cristales monoclínicos solamente un eje principal, *X*, *Y* o *Z*, coincide (para todas las longitudes de onda de la luz) con el eje de simetría, *b* ([5]), quedando los otros dos siempre contenidos dentro del plano perpendicular al eje *b* aunque ocupando distintos lugares dentro de este plano, dependiendo de las diferentes longitudes de onda (fig. 9-28A). Pueden coincidir con los ejes *a* o *c* solamente por casualidad. La dispersión de estos dos ejes principales (asociada con una dispersión de los ejes ópticos semejante a la discutida para los cristales ortorrómbicos; véase pág. 207), reduce la simetría de la distribución de las franjas de dispersión en las figuras de interferencia de los cristales monoclínicos. En algunos casos la distribución de esta franja de dispersión es lo suficientemente clara como para permitir no sólo una diferenciación de un cristal monoclínico de un ortorrómbico, sino además, si el cristal es monoclínico, la determinación del elemento que coincide con el eje *b*, o sea: 1) *Y*, normal óptica; 2) la bisectriz obtusa, o 3) la bisectriz aguda.

**Dispersión inclinada (b = Y).** Si el eje principal *Y* de la indicatriz coincide con el eje de simetría *b*, este eje es la dirección *Y* para la luz de cualquier longitud de onda; o sea, no hay ninguna dispersión de *Y* (fig. 9-28A). Más aún, para todas las longitudes de onda el plano óptico es perpendicular a este eje aunque dentro de este plano la localización de las bisectrices aguda y obtusa varía para las diferentes longitudes de onda. En consecuencia, esta dispersión de las bisectrices (añadida a la dispersión de los ejes ópticos) reduce la simetría de la disposición de las franjas de la dispersión que existía en el caso ortorrómbico. Como puede verse en la figura 9-28B, los colores de dispersión son simétricos bilateralmente con respecto a la traza de un solo plano (en contraste con los cristales ortorrómbicos, los cuales son simétricos con respecto a los dos). Esta traza, de raya-punto en la figura 9-28B, representa la traza del plano óptico para todas las longitudes de onda. Esta clase de dispersión, llamada inclinada, está caracterizada por un plano óptico común para toda luz pero con diferentes bisectrices agudas y posiciones del melatopo para las diferentes longitudes de onda.

**Dispersión paralela u horizontal (b = bisectriz obtusa).** Si la bisectriz obtusa (O. B.) coincide con el eje *b*, éste sirve de bisectriz obtusa para la luz de cualquier longitud de onda. Por otra parte, la normal óptica (*Y*) y la bisectriz aguda ocupan diferentes posiciones dentro del plano normal del eje *b* para las diferentes longitudes de onda; la figura 9-29A presenta sus posiciones para luz violeta y roja, únicamente. Los planos ópticos para las diferentes longitudes de onda (débilmente sombreado para la luz roja y más intensamente para la luz violeta o azul en la figura 9-29A) intersectan en una recta común el eje *b*. Dentro de una figura de la bisectriz aguda centrada en un cristal semejante (fig. 9-29B), los planos ópticos cortan el campo visual

([5]) Por definición, en los cristales monoclínicos el eje *b* coincide con el único eje binario, o con la normal al único plano de simetría, o con ambos.

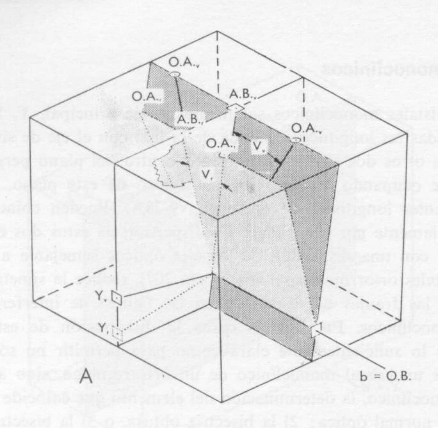
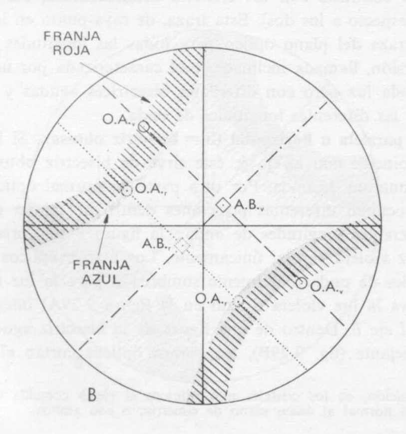



FIGURA 9-29

**Dispersión paralela u horizontal en un cristal monoclínico para el cual b = O.B. y r > v. (A) Cristal con orientación tal que produce una figura centrada de bisectriz aguda. La posición de la bisectriz aguda (A.B.) y de la normal óptica (Y) se detalla para los términos extremos del espectro visible, luz roja y violeta respectivamente. El plano óptico para la luz roja (débilmente sombreado) y para la luz violeta (fuertemente sombreado) se cortan en el eje b, el cual es bisectriz obtusa para todas las longitudes de onda. (B) Figura de la bisectriz aguda centrada de este cristal (a 45 grados de la posición de extinción). Las franjas teñidas en azul (sombreadas) señalan la posición de los melatopos rojos; las franjas rojizas (rayadas) señalan la posición de los melatopos violetas. La traza del plano óptico para la luz roja se representa por una línea de puntos; la correspondiente para la luz violeta, por una de trazos.**



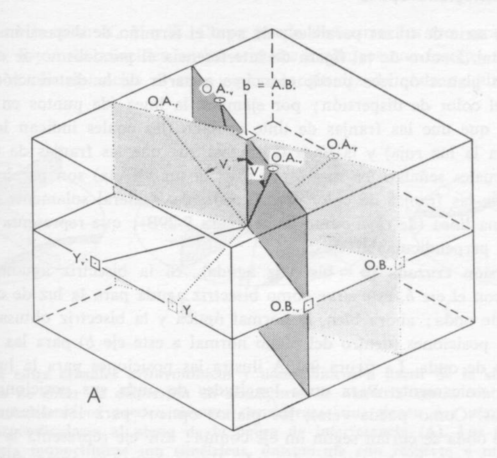
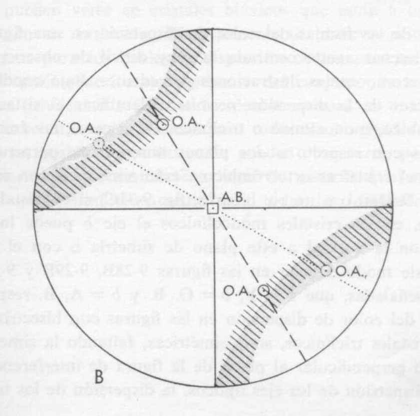



FIGURA 9-30

**Dispersión cruzada en un cristal monoclínico para el cual b = A.B. y r > v. (A) El cristal está orientado de un modo tal que produce una figura de bisectriz aguda centrada. Las posiciones de la bisectriz obtusa (O.B.) y normal óptica (Y) se señalan para la luz roja y la violeta, respectivamente. Los planos ópticos para la luz roja (débilmente sombreado) y para la luz violeta (fuertemente sombreado) se cortan según el eje b, el cual es bisectriz aguda para todas las longitudes de onda. (B) La figura de la bisectriz aguda centrada de este cristal (a 45 grados de la extinción). Las franjas azuladas (sombreadas) señalan las posiciones de los melatopos rojos; las franjas rojizas (rayadas) señalan las posiciones de los melatopos violetas. La traza de plano óptico para la luz roja se presenta como una línea de puntos, en tanto que para la luz violeta, es de trazos.**



según una serie de trazas paralelas; de aquí el término de dispersión paralela u horizontal. Dentro de tal figura de interferencia el paralelismo de estas trazas de los planos ópticos puede reducirse a partir de la distribución de las franjas del color de dispersión; por ejemplo, la línea (de puntos en la figura 9-29B) que une las franjas de tinte azulado (las cuales indican los melatopos para la luz roja) y la línea (a trazos) que une las franjas de tinte rojizo (las cuales señalan los melatopos para la luz violeta) son paralelas. Obsérvese que las franjas de color son de simetría bilateral solamente con respecto a una línea (de raya-punto en la figura 9-29B); que representa la traza del plano perpendicular al eje *b*.

**Dispersión cruzada (b = bisectriz aguda).** Si la bisectriz aguda (A. B.) coincide con el eje *b*, éste sirve como bisectriz aguda para la luz de cualquier longitud de onda; ahora bien, la normal óptica y la bisectriz obtusa ocupan diferentes posiciones (dentro del plano normal a este eje *b*) para las distintas longitudes de onda. La figura 9-30A ilustra las posiciones para la luz roja y la violeta únicamente. Para otras longitudes de onda sus posiciones serían intermedias. Como puede verse, los planos ópticos para las diferentes longitudes de onda se cortan según un eje común; este eje representa la bisectriz aguda para todas las longitudes de onda. En consecuencia como puede verse en la figura de interferencia (fig. 9-30B), las trazas de los planos ópticos para las diferentes longitudes de onda se cortan unas a otras en el punto de emergencia de su bisectriz aguda común; de ahí el término de dispersión cruzada. La disposición de las franjas de dispersión en la figura 9-30B revela que no existe ningún plano de simetría perpendicular al campo visual. La normal al campo visual puede, sin embargo, considerarse como un eje de simetría binaria. Esta normal coincide con el eje *b* del cristal.

## Diferenciación de los sistemas cristalinos

La simetría de las franjas del color de dispersión en una figura de interferencia con bisectriz aguda centrada es muy difícil de observar, raramente se ve tan clara como en las ilustraciones precedentes. Bajo condiciones favorables, los efectos de la dispersión permiten identificar el sistema cristalino como ortorrómbico, monoclínico o triclínico. En general, las franjas de color serán simétricas con respecto a *dos* planos mutuamente perpendiculares (figura 9-31A) si el cristal es ortorrómbico. Serán simétricas con respecto a *un* solo plano (fig. 9-31B) o a un eje binario (fig. 9-31C) si el cristal es monoclínico. Mas aún, en los cristales monoclínicos el eje *b* puede localizarse, ya que coincide con la normal a este plano de simetría o con el eje binario; se podría de este modo deducir en las figuras 9-28B, 9-29B y 9-30B, aunque no estuvieran señaladas, que $b = Y$, $b =$ O. B. y $b =$ A. B. respectivamente.

Las franjas del color de dispersión en las figuras con bisectriz aguda centrada de los cristales triclínicos, son asimétricas, faltando la simetría bilateral o el eje binario perpendicular al plano de la figura de interferencia. Además, se añade a la dispersión de los ejes ópticos, la dispersión de los tres ejes prin-

cipales de vibración *X*, *Y* y *Z*. Como puede deducirse, los tres ejes cristalográficos *a*, *b* y *c* no coinciden en los cristales triclínicos con los ejes *X*, *Y* y *Z* (excepto en circunstancias al azar y para longitudes de onda de luz particulares).

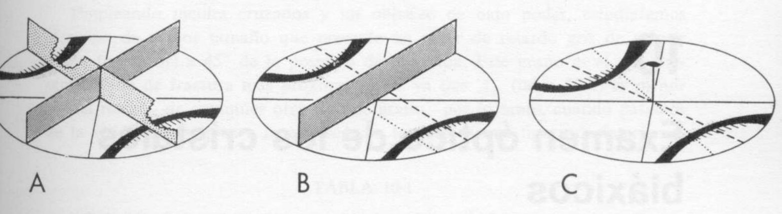



FIGURA 9-31

**Diferencia entre cristales ortorrómbicos y monoclínicos a partir de la simetría de las franjas de color de dispersión en sus figuras de bisectriz aguda centrada. Los cristales ortorrómbicos pueden siempre considerarse que tienen dos planos de simetría perpendiculares al plano de la figura de interferencia (A). Las figuras de interferencia monoclínicas son simétricas, únicamente con respecto a uno de los planos (B) o al eje binario perpendicular al plano de la figura de interferencia (C). El eje b de ambos cristales monoclínicos es la dirección perpendicular a este plano (B) o coincide con el eje binario (C).**

## Colores anormales de interferencia

Los colores anormales de interferencia, vistos en los cristales biáxicos a 45° de la posición de extinción, son similares en su origen a aquellos que previamente fueron trazados para los cristales uniáxicos (pág. 171). Ahora bien, colores de interferencia anormales, de origen completamente diferente de aquéllos, pueden verse en cristales biáxicos que están a un grado o dos de una posición de extinción. El fenómeno se observa principalmente en cristales biáxicos para los cuales la dispersión de los principales ejes de vibración (*X*, *Y* y *Z*) o de los ejes ópticos o del conjunto, es tan acusada que las direcciones privilegiadas para la incidencia normal en una cara determinada no son exactamente las mismas para todas las longitudes de onda de la luz. Cerca de las posiciones de extinción pueden observarse, por consiguiente, colores de interferencia anormales en lugar de oscuridad, al no estar nunca el cristal extinguido simultáneamente para todas las longitudes de onda de la luz blanca.

# 10

# Examen óptico de los cristales biáxicos

En todos los aspectos la preparación de la muestra de los cristales biáxicos es la misma que para los uniáxicos (véase pág. 143). Los granos machacados, si no tienen una exfoliación dominante, presentarán superficies de fractura con una orientación variada con respecto a los ejes principales $X$, $Y$ y $Z$ y a los ejes ópticos. Siempre que una superficie de fractura sea paralela a un eje principal, este eje servirá de dirección privilegiada para el grano. En consecuencia, el grano presentará un índice de refracción principal ($\alpha$, $\beta$ o $\gamma$) siempre que este eje principal ($X$, $Y$ o $Z$, respectivamente) sea paralelo a la dirección privilegiada del polarizador. La tabla 10-1 resume los índices de refracción medidos en granos que presentaban los diferentes tipos de superficies previamente discutidos (véase pág. 185 y tabla 9-2). Si, como es el caso de las micas, una exfoliación dominante es causa de que todos los granos presenten superficies ópticamente idénticas, se pueden añadir fragmentos de vidrio al montaje de aceite antes de añadir el mineral. Los granos de mineral sostenidos y apuntalados por los fragmentos de vidrio presentarán una variada gama de orientaciones ópticas. La platina de aguja (Rosenfeld, 1950; Wilcox, 1959) resuelve también este problema de modo barato y satisfactorio.

Exceptuando la exfoliación dominante, la mayoría de los granos en un montaje de polvo presentan planos cualesquiera. La medida de sus índices es de pequeño valor ya que los valores medidos, $\alpha'$ y $\gamma'$, diferirán de un grano a otro. Los índices importantes, $\alpha$, $\beta$ y $\gamma$, por otra parte, sólo pueden medirse en los pocos granos que presentan planos principales o semigenerales (tabla 10-1). El microscopista afronta la tarea de entresacar estos granos de entre los miles de granos con orientación general que hay en la montura. Las técnicas para reconocer los tipos y subtipos de los granos serán discutidas cuando nos refiramos al problema de medir $\alpha$, $\beta$ y $\gamma$. Ahora bien, se discutirá primero la determinación del signo óptico de los minerales biáxicos, ya que en la óptica mineralógica práctica, esto es normalmente una de las primeras características ópticas que hay que establecer.

## DETERMINACIÓN DE LA BIAXIALIDAD

Empleando nicoles cruzados y un objetivo de bajo poder, estudiaremos el grano de mayor tamaño que presente un color de retardo gris de primer orden (o menor) a 45° de la posición de extinción. Este grano es el que presenta plano de fractura más próximo al *YC* ya que $\Delta_{yc}$ (tabla 10-1) es menor que el retardo de cualquier otro tipo de grano; por lo tanto, cuando pasemos de la visión ortoscópica a la conoscópica tendremos una figura de interferen-

TABLA 10-1

Relación de la orientación entre el plano basal del grano y sus índices de refracción y retardo

| *Plano basal* | *Índices de refracción medidos en direcciones privilegiadas del grano* | *Retardo para un grano de espesor t* |
|---|---|---|
| | (1) Planos principales | |
| *XY* | $\alpha$ y $\beta$ | $\Delta_{xy} = (\beta - \alpha)t$ |
| *XZ* | $\alpha$ y $\gamma$ | $\Delta_{xz} = (\gamma - \alpha)t$ |
| *YZ* | $\beta$ y $\gamma$ | $\Delta_{yz} = (\gamma - \beta)t$ |
| | (2) Planos semigenerales | |
| *XZ'* | $\alpha$ y $\gamma'$ | $\Delta_{xz'} = (\gamma' - \alpha)t$ |
| *YX'* | $\beta$ y $\alpha'$ | $\Delta_{yx'} = (\beta - \alpha')t$ |
| *YZ'* | $\beta$ y $\gamma'$ | $\Delta_{yz'} = (\gamma' - \beta)t$ |
| *YC* | $\beta$ solamente | $\Delta_{yc} = 0$ |
| *ZX'* | $\gamma$ y $\alpha'$ | $\Delta_{zx'} = (\gamma - \alpha')t$ |
| | (3) Planos generales | |
| *X'Z'* | $\alpha'$ y $\gamma'$ | $\Delta_{x'z'} = (\gamma' - \alpha')t$ |

cia de ejes ópticos centrados o casi centrados, a partir de la cual la naturaleza del cristal biáxico y el signo óptico son fácilmente determinables. También los granos que no están bien orientados permiten estas determinaciones; ahora bien, la presencia de un eje óptico en el campo visual simplifica la determinación del signo y, en resumen, permite reconocer con toda seguridad la naturaleza biáxica del cristal. En este aspecto, obsérvese que una figura descentrada de un cristal biáxico de pequeño $2V$ no se diferencia de la de un cristal uniáxico descentrado (véase fig. 9-21). La biaxialidad puede a menudo establecerse aunque los ejes ópticos no aparezcan en el campo. Para estudiar estas figuras, giraremos la platina hasta que una isogira pase

a través de la intersección de los hilos de retículo. En esta posición de la platina, si la isogira no es paralela a uno de los hilos (como, por ejemplo, en la figura 9-22A), el mineral es definitivamente biáxico. Si la isogira es paralela, puede ser biáxico o uniáxico (fig. 9-22B).

## DETERMINACIÓN DEL SIGNO ÓPTICO

Las direcciones de vibración de los rayos que emergen de una figura de interferencia de bisectriz aguda para un cristal ( — ) pueden verse en la figura 10-1A y en la 10-1B para un cristal ( + ). En cada pareja de rayos que emergen en el mismo punto, la dirección de vibración del rayo más lento,

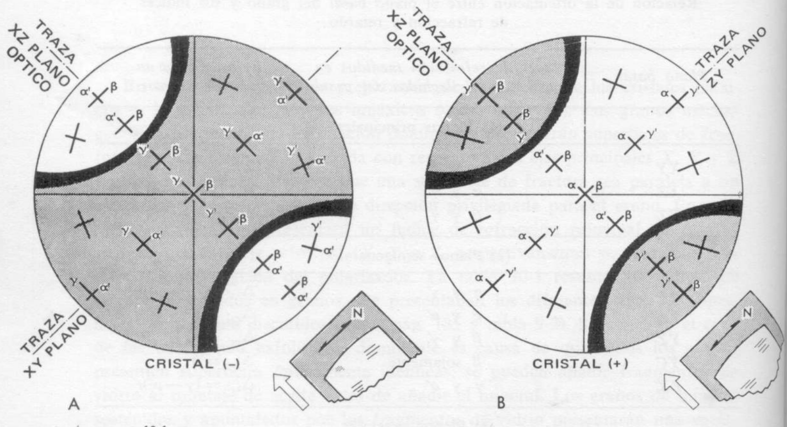



FIGURA 10-1

**Las direcciones de vibración N y n de los rayos lentos y rápidos, respectivamente, se presentan en un punto de emergencia en el campo visual como dos líneas mutuamente perpendiculares, la mayor representa la dirección N. Las áreas sombreadas representan zonas donde la disminución aparece después de la inserción de una lámina compensadora con su dirección N perpendicular al plano óptico. (A) Figura de una bisectriz aguda centrada de un cristal (—). (B) Figura de una bisectriz aguda centrada de un cristal (+).**

es decir el correspondiente al mayor índice de refracción, se ha dibujado más larga que la correspondiente al rayo más rápido. La inserción de una lámina accesoria con su dirección *N* perpendicular al plano óptico de estos cristales produce una disminución en las zonas sombreadas de las figuras de interferencia y un aumento de color en las no sombreadas. Téngase pues en cuenta que en la región próxima al punto de emergencia de la bisectriz aguda hay

disminución de color en los cristales negativos (fig. 10-1A) y aumento en los cristales positivos (fig. 10-1B).

Las isogiras en una figura de bisectriz aguda a 45° de la extinción, no la dividen en cuatro cuadrantes distintos, del modo que lo hacía la cruz uniáxica en figuras de interferencia uniáxicas. Al contrario, únicamente dos cuadrantes son definidos por las isogiras; éstos son: los no sombreados de la figura 10-1A y los sombreados de la figura 10-1B. Los dos cuadrantes restantes están, pudiera decirse, confundidos y, en ambos casos, formando un área de orientación NE-SO. Igual que en los cristales uniáxicos (pág. 149), una línea que una los cuadrantes donde hay sustracción será paralela a la dirección *N* de la lámina insertada si el cristal es ópticamente negativo, pero la línea será perpendicular a la dirección *N* —formando así un imaginario signo más— si el cristal es ópticamente positivo. Por ejemplo, en la figura 10-1A, obsérvese que la sustracción se produjo en los cuadrantes confundidos y que la línea que une los centros de tales cuadrantes sería NE-SO —es decir, paralela a la dirección *N* del accesorio insertado—. En la figura 10-1B, la línea que une los dos cuadrantes de disminución vendría orientada NO-SE, y sería una dirección perpendicular a la dirección *N* del accesorio.

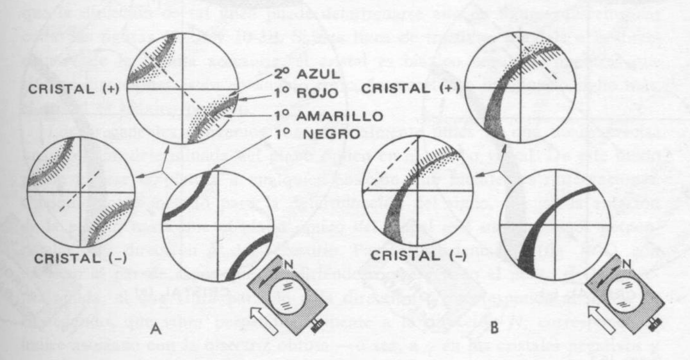



FIGURA 10-2

**(A) Determinación del signo óptico de una figura de bisectriz aguda centrada por inserción de una lámina de rojo de primer orden (yeso). Si el plano óptico queda perpendicular a la dirección N de la lámina, se producirá un amarillo de primer orden (áreas rayadas) en el lado convexo de la isogira para los cristales negativos, y en el cóncavo para los positivos. Una línea de trazos que une los centros de los cuadrantes en los cuales aparece la disminución, ha sido añadida para ilustrar una convención alternativa usada en la determinación del signo. Esta línea de trazos sería siempre paralela a la dirección N de la lámina compensadora en los cristales negativos, y perpendicular en el caso de los cristales positivos. (B) Determinación del signo óptico en las figuras descentradas. La relación de estas figuras con las centradas en (A) se ha visualizado fácilmente. El estudiante puede mejorar los dibujos (A) y (B) colocando de amarillo las áreas rayadas y de azul las punteadas.**

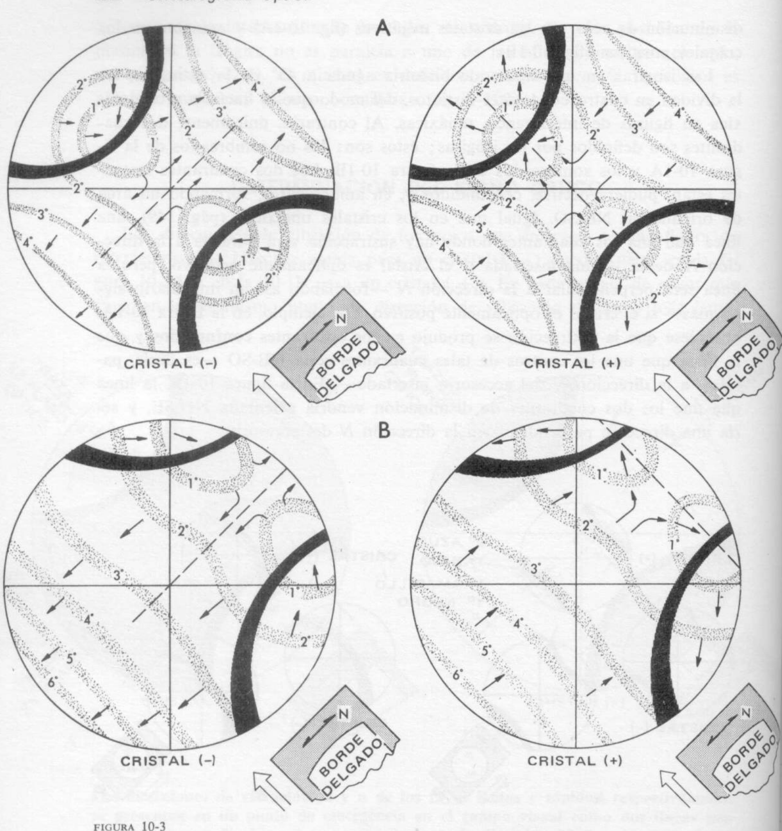



FIGURA 10-3

**(A) Determinación del signo óptico de una figura de bisectriz aguda centrada por inserción de una cuña de cuarzo, empezando por el borde delgado. Si el plano óptico es perpendicular a la dirección N de la cuña, aparece sustracción en el centro del campo de un cristal negativo (lado izquierdo); en esta área obsérvese que las isocromas de menor orden se mueven hacia las de mayor orden, siendo señalada la dirección de su movimiento durante la inserción de la cuña por flechas pequeñas. Para un cristal positivo (lado derecho) el aumento aparece en el centro del campo, moviéndose las isocromas de mayor orden hacia la de más bajo en esta región. Igual que en la figura 10-2 una línea a trazos se ha dibujado entre los centros de los cuadrantes en los que aparece la sustracción. (B) La determinación del signo óptico en las figuras descentradas es posible siempre que su relación con la figura centrada en (A) puede establecerse. En ambas figuras descentradas es necesario determinar la dirección de la línea a trazos que une los centros de los cuadrantes de sustracción para poder determinar el signo óptico.**

En la práctica, el signo óptico de un cristal se determina localizando las zonas de sustracción y adición en sus figuras de interferencia: 1) intercalando una lámina de rojo de primer orden (yeso), si la figura presenta pocas isocromas, o 2) intercalando la cuña de cuarzo, si la figura presenta muchas isocromas. Después de la inserción, la lámina de rojo de primer orden hace que las áreas de blanco 1.º en la región de los melatopos se transformen en un amarillo 1.º a lo largo de las isogiras próximas a los cuadrantes en los que ha ocurrido la sustracción (fig. 10-2, áreas rayadas) y en un azul 2.º (áreas punteadas) a lo largo de los bordes próximos a los cuadrantes donde ha habido adición. Si se hace la observación a la vez que se inserta la cuña de cuarzo, entrando primeramente el borde delgado, los cuadrantes de sustracción (fig. 10-3) están caracterizados por isocromas de bajo orden que se mueven hacia las de orden más elevado y las desplazan; siendo a la inversa en los cuadrantes de adición. De este modo obsérvese en la figura 10-3A (izquierda) que la sustracción se da en los cuadrantes NE y SO (mezclados) y el aumento en los cuadrantes individuales NO y SE. En la figura 10-3A (derecha) estos efectos están invertidos. En las figuras 10-2 y 10-3 se ha dibujado una línea de trazos —para efectos ilustrativos solamente— que unen los centros de los cuadrantes de sustracción. Obsérvese, con un poco de imaginación, que la dirección de tal línea puede determinarse aun en figuras descentradas como las figuras 10-2B y 10-3B. Si esta línea de trazos es paralela a la dirección *N* de la lámina accesoria, el cristal es biáxico negativo, mientras que si estas direcciones están en ángulo recto, formando un imaginario signo más, el cristal es biáxico positivo.

Los precedentes convenios son especialmente útiles ya que no se precisa una posición determinada del plano óptico en el campo visual. De este modo puede girarse la platina a cualquier posición que facilite las observaciones. Cualquier otro método para la determinación del signo, precisa la rotación de la platina hasta que el plano óptico del cristal esté más o menos perpendicular a la dirección *N* del accesorio. Para esta orientación (fig. 10-1), con respecto al par de rayos que interfiriéndose emergen en el punto de la bisectriz aguda, el que vibra paralelo a la dirección *N*, corresponde al índice $\beta$. El segundo, que vibra perpendicularmente a la dirección *N*, corresponde al índice asociado con la bisectriz obtusa —o sea, a $\gamma$ en los cristales negativos y a $\alpha$ en los positivos—. Por consiguiente, en la región de la bisectriz aguda hay sustracción en los cristales negativos y adición en los cristales positivos cuando se intercala una lámina accesoria cuya dirección *N* esté cruzada con el plano óptico del cristal.

En las figuras de interferencia en las cuales los melatopos caen lejos del campo visual, el método de Kamb (véase pág. 203) permite, a menudo, distinguir entre una figura de bisectriz aguda con un $2V$ muy grande y una figura de bisectriz obtusa. En este último caso los resultados serán los contrarios de los obtenidos cuando se determinaba el signo óptico en la figura de la bisectriz aguda del mismo mineral.

## MEDIDAS DE ÍNDICES

### Determinación de $\beta$

El mismo grano con un color de retardo gris de primer orden que usamos para la determinación del signo, permite medir fácilmente el índice de refracción $\beta$. Si el grano se apoya sobre una superficie de fractura paralela a una sección circular (*YC*) de la indicatriz, se observará una figura de eje óptico centrado (fig. 9-17A) y el cristal presentará el índice de refracción $\beta$ para todas las posiciones de la platina del microscopio. Por lo tanto, para tales granos, simplemente se necesita pasar de visión conoscópica a ortoscópica y entonces comparar el índice de refracción del grano (o sea $\beta$) con el índice de refracción del aceite (mediante la línea de Becke o la iluminación oblicua). El índice de refracción $\beta$ puede también medirse en granos orientados de modo análogo a las láminas *A* o *B* en la figura 10-4, como se discutirá en las páginas siguientes.

### Determinación de $\alpha$ y $\gamma$

Con la iluminación ortoscópica, muévase la preparación (se sugiere el objetivo de bajo poder) para encontrar un grano relativamente pequeño que posea un color de retardo de mayor orden que cualquier otro. Las direcciones privilegiadas de tal grano son por lo tanto las que corresponden a $\alpha$ y $\gamma$; si los granos de la montura se han elegido previamente de modo que tengan un espesor más o menos constante, este grano sería (de todos los de la montura) el que presentaría los colores del máximo retardo, en virtud de su birrefringencia ($\gamma - \alpha$), que excede a la de cualquier grano con otra orientación. Los granos correctamente orientados presentarían, conoscópicamente, figuras de normal óptica, puesto que, para esta orientación, *X* y *Z* estarían colocados paralelos al plano en que se apoyan, mientras *Y*, la normal óptica, es perpendicular a él y emerge en el centro de la figura de interferencia. Conviene estudiar la figura de interferencia por el método de Kamb para estar seguros de que representa una figura de la normal óptica en lugar de una figura de bisectriz obtusa. Los índices de refracción $\alpha$ y $\gamma$ pueden medirse también en otros granos distintos de los que producen figuras de la normal óptica. El reconocimiento y la correcta orientación de tales granos por medio de sus figuras será discutido más adelante.

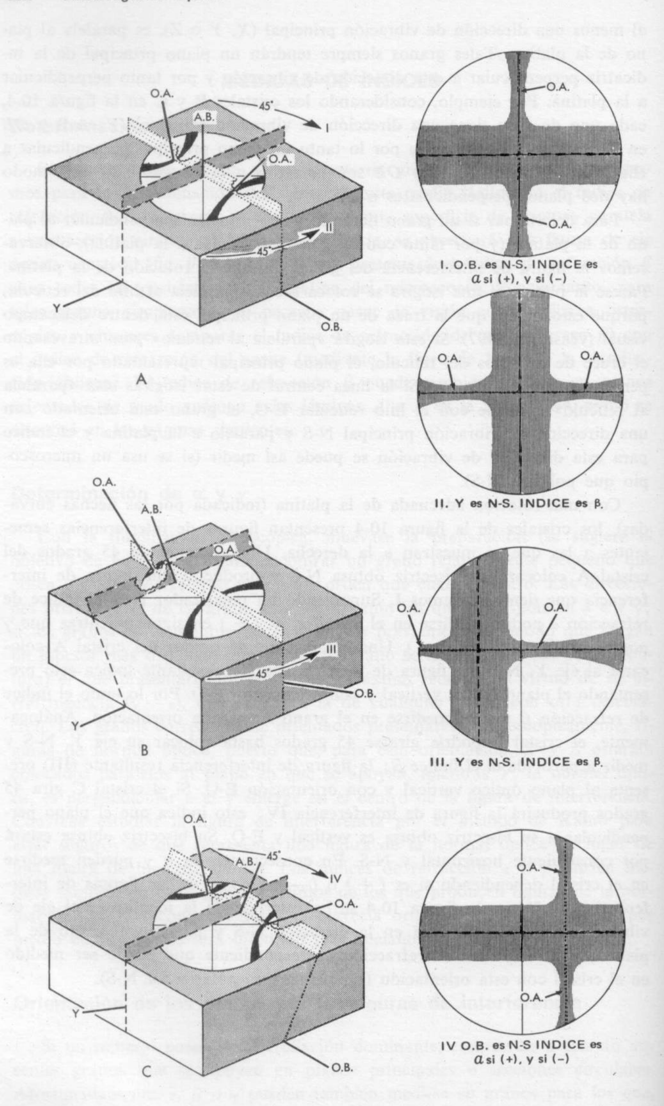
### Orientación de los granos por las figuras de interferencia

Si un mineral posee una exfoliación dominante, escasearán o estarán ausentes granos que se apoyen en planos principales o secciones circulares. Afortunadamente, $\alpha$, $\beta$ o $\gamma$ pueden también medirse en granos para los que,

al menos una dirección de vibración principal (*X*, *Y* o *Z*), es paralela al plano de la platina. Tales granos siempre tendrán un plano principal de la indicatriz perpendicular a esta dirección de vibración y por tanto perpendicular a la platina. Por ejemplo, considerando los cristales B y C en la figura 10-4, cada uno de ellos tiene una dirección de vibración principal (*Y* en B y *OB* en C) paralela a la platina y por lo tanto un plano principal perpendicular a ella. Para el cristal *A*, *Y* y *OB* son paralelos a la platina y de este modo hay dos planos perpendiculares a ella.

Para determinar si un grano tiene un plano principal perpendicular al plano de la platina (y por tanto con *X*, *Y* o *Z* paralelos a la platina), observaremos la figura de interferencia del grano durante la rotación de la platina. Párese la platina si una isogira se coloca recta y paralela al hilo del retículo, porque esto indica que la traza de un plano principal está dentro del campo visual (véase pág. 197). Si esta isogira «paralela al retículo» pasa atravesando el cruce de los hilos del retículo, el plano principal representado por ella es perpendicular a la platina. Si la línea central de estas isogiras está «paralela al retículo» coincide con el hilo reticular E-O, el grano está orientado con una dirección de vibración principal N-S y paralelo a la platina y el índice para esta dirección de vibración se puede así medir (si se usa un microscopio que polariza N-S).

Con una rotación adecuada de la platina (indicada por las flechas curvadas), los cristales de la figura 10-4 presentan figuras de interferencias semejantes a las que se muestran a la derecha. Una rotación de 45 grados del cristal A colocará su bisectriz obtusa N-S y producirá una figura de interferencia que denominaremos I. Suponiendo un polarizador N-S, el índice de refracción $\alpha$ podría medirse en el cristal si es ( + ) en signo, mientras que $\gamma$ podría medirse si fuese (—). Una rotación de 45 grados del cristal A colocaría al eje *Y*, N-S; la figura de interferencia (II) resultante indica esto presentando el plano óptico vertical y con orientación E-O. Por lo tanto el índice de refracción $\beta$ podría medirse en el grano A en esta orientación. Análogamente, el cristal B podría girarse 45 grados hasta colocar su eje *Y*, N-S y medir a partir de él el índice $\beta$; la figura de interferencia resultante (III) presenta al plano óptico vertical y con orientación E-O. Si el cristal C gira 45 grados producirá la figura de interferencia IV; esto indica que el plano perpendicular a su bisectriz obtusa es vertical y E-O. Su bisectriz obtusa estará por consiguiente horizontal y N-S. En consecuencia, $\alpha$ o $\gamma$ pueden medirse en el cristal dependiendo si es ( + ) o (—). Debajo de las figuras de interferencia I a IV en la figura 10-4 se ha inscrito: 1) la identidad del eje de vibración principal que está en la dirección N-S y paralelo al plano de la platina, y 2) el índice de refracción correspondiente que puede ser medido en el cristal con esta orientación (suponiendo un polarizador N-S).



O.A.
A.B.
45°
I
O.A.
II
45°
Y
O.B.
A
O.A.
O.A.
I. O.B. es N-S. INDICE es
α si (+), γ si (−)
O.A.
O.A.
II. Y es N-S. INDICE es β.
O.A.
A.B.
O.A.
III
45°
O.B.
Y
B
O.A.
O.A.
III. Y es N-S. INDICE es β.
O.A.
A.B.
45°
IV
O.A.
Y
O.B.
C
O.A.
O.A.
IV O.B. es N-S INDICE es
α si (+), γ si (−)

## MEDIDA DE 2V

El valor de $2V$ puede calcularse rápidamente a partir de los valores medidos de $\alpha$, $\beta$ y $\gamma$ usando el mapa de Mertie (fig. 9-6A), como ya se ha discutido (pág. 179). Ahora bien, para cristales de baja birrefringencia, pequeños errores experimentales en la determinación de $\alpha$, $\beta$ y $\gamma$ pueden producir un gran error en el valor de $2V$ así determinado. De modo aproximado $2V$ puede calcularse a partir de la curvatura de las isogiras cuando el plano óptico está a 45 grados de las direcciones de vibración de los polarizadores (figura 10-5A). Generalmente, se usan los siguientes métodos para medir con más rigor el valor de $2V$.

### Método de Mallard

Si aparecen dos melatopos dentro del campo visual, puede usarse el método de Mallard para determinar $2V$. La ecuación pertinente es:

$$D = K \text{ sen } E = K\ \beta \text{ sen } V$$

donde $D$ representa la mitad de la distancia entre los melatopos medida en unidades de la escala de un micrómetro ocular (fig. 10-5B) y $K$ representa una constante (llamada generalmente constante de Mallard), cuyo valor depende de la abertura numérica del objetivo y del número de divisiones de la escala micrométrica correspondientes a un diámetro del campo visual. Para un microscopio, objetivo y micrómetro dados, el valor de $K$ puede determinarse con cristales de $2E$ conocido (por ejemplo, barita, $2E = 63°\ 12'$, $\beta =$ $= 1{,}636$; o aragonito, $2E = 30°\ 52'$, $\beta = 1{,}681$) que cortan normalmente a la bisectriz aguda. Suponiendo que la figura 10-5B representa la figura de la

---

FIGURA 10-4

Columna izquierda: **Aspecto de la figura de interferencia de un cristal a 45 grados de la posición de extinción dibujada en su superficie superior. Se han representado el plano óptico (punteado) y el plano principal normal a la bisectriz obtusa (fuertemente sombreado). Para el cristal A, ambos planos son perpendiculares a la platina sobre la que se apoya siendo paralelas a dicha platina la bisectriz obtusa (O.B.) y la normal óptica (Y). (En el dibujo se ha suprimido la platina sobre la cual se apoya el cristal.) Para el cristal B, solamente la normal óptica es paralela a la platina, de este modo únicamente el plano óptico es perpendicular a la platina. En el cristal C, solamente la bisectriz obtusa es paralela a la platina, así pues únicamente el plano fuertemente sombreado es perpendicular a la platina.** Columna derecha, I-IV: **Aspecto de las figuras de interferencia de los granos si los cristales se giran (véanse las flechas curvadas) de tal modo que las trazas de los planos principales quedan paralelas a los retículos, cada uno permite medir el índice de refracción para el grano en tal orientación (supuesto el polarizador N-S).**

bisectriz aguda de la lámina de barita, puede verse en ella como $D$ mide aproximadamente 22,5 unidades. La constante de Mallard para este microscopio sería entonces

$$K = \frac{D}{\text{sen } E} = \frac{22{,}5}{\text{sen } 31^\circ\ 36'} = 42{,}9$$

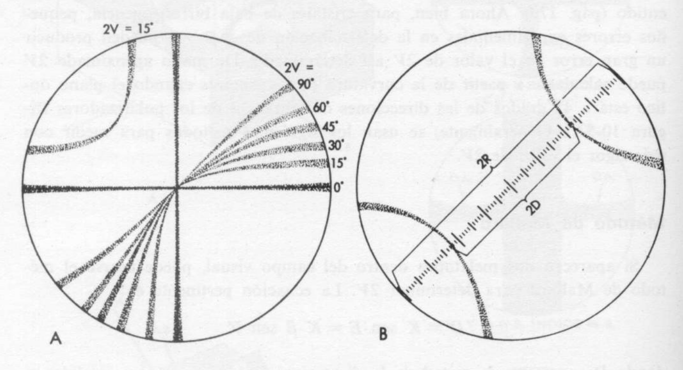



FIGURA 10-5

**(A) Determinación de 2V a partir de la curvatura de las isogiras cuando el plano óptico está a 45 grados (NO-SE) con respecto del polarizador. La curvatura de las isogiras se ilustra para intervalos de 15 grados de 2V.** (De Wright, 1907, página 338.) **Ambas ramas de la hipérbola se dibujan para 2V = 0° y 2V = 15°. (B) Uso del micrómetro ocular para medir 2D según el método de Mallard y 2D/2R en el de Tobi.**

De aquí que si el mismo microscopio, objetivo y micrómetro se usan para medir $D$ a partir de la figura de una bisectriz aguda centrada o casi centrada de un cristal no conocido, $2E$ o $2V$ pueden calcularse a partir de las ecuaciones aplicables a este microscopio, o sea:

$$\text{sen } E = \frac{D}{K} = \frac{D}{42{,}9}$$

$$\text{sen } V = \frac{D}{42{,}9\ \beta}$$

Para trabajos muy precisos, la constante de Mallard podría determinarse (para la combinación a usar de microscopio-objetivo-micrómetro) midiendo en dos o tres cristales diferentes cuyos valores conocidos de $2E$ difieran ampliamente.

## Método de Tobi

El método de Tobi (1956, pág. 516) elimina la necesidad de determinar la constante de Mallard, puesto que se mide el doble del radio del campo visual (o sea $2R$) además de $2D$, la distancia entre melatopos en la figura 10-5B. Si la abertura numérica del objetivo usado era 0,85, la figura 10-6 permite determinar $2E$ y $2V$ para el mineral a partir de la razón $2D/2R$. Como A indica, el valor de $2D/2R$ se localiza en un punto del eje vertical, punto que también pertenece a una diagonal; cuando seguimos esta diagonal hacia arriba llegamos hasta el valor de $2E$ para el cristal medido. Análogamente, B nos muestra como los valores de $2D/2R$ y de $\beta$ representan las coordenadas de un punto en el interior del diagrama de Tobi; este punto pertenece a una diagonal tal, que su prolongación señala el valor de $2V$ para este cristal.

La figura 10-6 fue construida para un objetivo de N. A. 0,85. Si se utiliza un objetivo de abertura numérica diferente ($A'$), el diagrama de Tobi permite, como en el caso anterior, determinar $2E$ y $2V$, con tal de que el valor $2D/2R$ medido con este objetivo sea previamente multiplicado por la razón $A'/0{,}85$. Si este objetivo se usa de ordinario, el paso anterior puede eliminarse multiplicando todos los valores $2D/2R$ de la figura 10-6 por $0{,}85/A'$. Con su escala vertical así establecida, la figura 10-6 podría aplicarse al cálculo de $2D/2R$ con este nuevo objetivo.

Tobi establece que el método puede aplicarse a las figuras de bisectriz aguda descentradas con tal que la traza del plano óptico pase a través o próxima al centro del campo visual. (En la figura 10-4B, si ambos melatopos fueran visibles, ilustrarían el caso.) La distancia entre melatopos, $2D$, podría medirse como en el caso de las figuras centradas y la razón $2D/2R$ daría los valores de $2V$ con un error de 1 grado o menos (Tobi, pág. 519).

## Otros métodos

Para las figuras de interferencia centradas en las cuales ambos melatopos yacen fuera del campo visual, $2V$ puede medirse por el método de Kamb (véase pág. 203). Frecuentemente si la figura no está centrada se usa la platina universal, instrumento que puede montarse en la platina del microscopio y permite que el grano pueda girarse e inclinarse en casi todas las posiciones, y se puede usar para medir $2V$ con una aproximación de 1 a 2 grados. Los mecanismos consiguientes se salen de los propósitos de este libro. Emmons (1943) analizó el método con gran detalle, y la aproximación a la que se puede llegar fue discutida por Fairbairn y Podolsky (1951, pág. 823) y por Wyllie (1959).

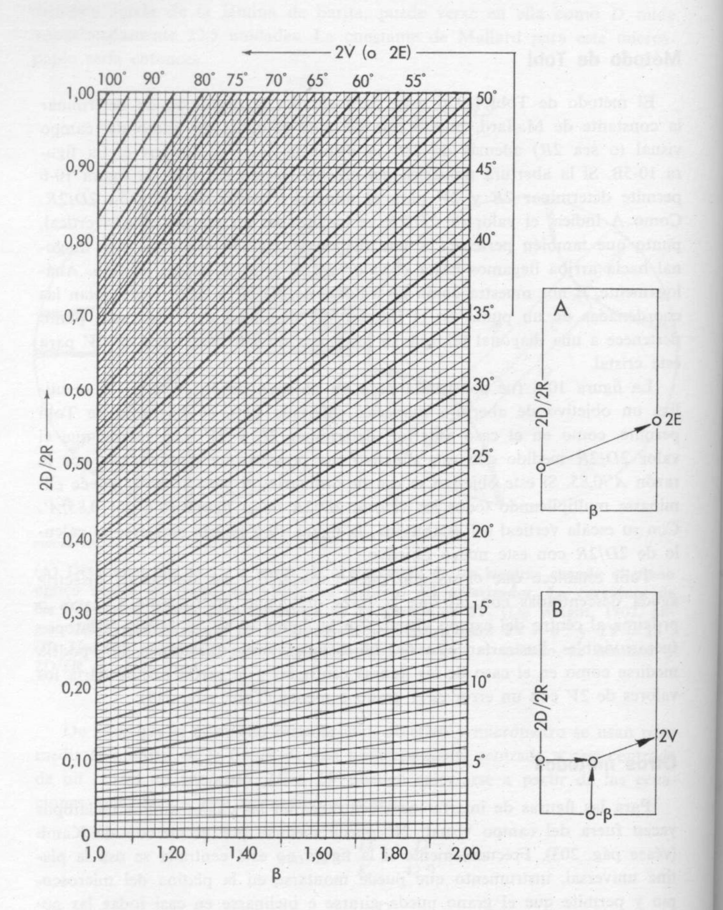



FIGURA 10-6

**Diagrama para la determinación de 2V o 2E en las figuras de interferencia.** (De Tobi, 1956). **El esquema A muestra el empleo del mapa para determinar 2E si se ha medido 2D/2R; el esquema B indica su uso, para determinar 2V a partir de los valores de B y de 2D/2R. En cada caso el punto determinado por los valores medidos (encerrados en circulitos en los esquemas A y B) cae en una diagonal que indica el valor del ángulo óptico.**

## MEDIDAS Y SIGNIFICADO DE LOS ÁNGULOS DE EXTINCIÓN

Las relaciones angulares entre los planos de exfoliación de un cristal (o de las caras del cristal desarrolladas por su hábito) y sus direcciones $X$, $Y$ y $Z$ determinan el ángulo de extinción y el signo de la elongación. En los minerales biáxicos hay tres tipos de extinción: 1) *paralela* o *recta;* 2) *simétrica,* y 3) *oblicua* o *inclinada.* Los primeros dos tipos han sido descritos para los cristales uniáxicos (pág. 166) y no necesitan más comentarios. El tercer tipo, extinción inclinada u oblicua, aparece si las direcciones privilegiadas del grano no son paralelas a los caracteres cristalográficos citados —o sea, a sus caras (fig. 10-7A); a sus planos de exfoliación (fig. 10-7B); o a las trazas de

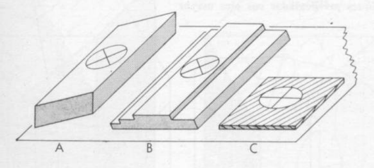



FIGURA 10-7

**Extinción inclinada con respecto a (A) los planos de un cristal elongado, (B) planos de exfoliación en un fragmento de exfoliación elongado, y (C) trazas de los planos de exfoliación de una sección delgada del mineral. En (B) obsérvese que la exfoliación superior (horizontal) está caracterizada por el desarrollo de un área superficial muy grande paralela a ella.**

sus planos de exfoliación (fig. 10-7C), si es en una sección delgada—. En consecuencia, si tales cristales están extinguidos, los caracteres cristalográficos citados formarán un ángulo $T$ (ángulo de extinción) con los hilos del retículo. Para los piroxenos y anfíboles, $T$ es el ángulo entre la dirección privilegiada $N_g$ y la traza de la exfoliación; para los feldespatos, es el ángulo entre la dirección privilegiada $n$ y la traza de exfoliación. En consecuencia $T$ puede variar desde 0 a 90 grados entre los diferentes miembros de los grupos de los piroxenos o de los anfíboles. Las técnicas para medir $T$ en los minerales biáxicos no necesitan discusión ya que son las mismas que para los uniáxicos (pág. 166).

En la terminología cristalográfica una *zona* es un conjunto de caras, todas las cuales, así como las líneas de su mutua intersección, son paralelas a una línea dada (o sea al *eje de zona*). Las caras ($h\bar{k}0$), (100), ($hk0$), (110), y (010) en la figura 10-8 pertenecen a la misma zona, siendo $c$ el eje de zona. Si un eje de zona coincide con un eje de vibración principal, $X$, $Y$ o $Z$, todas las

caras de la zona tendrán una dirección privilegiada (para incidencia normal) paralela a este eje de vibración principal (por ejemplo, las caras paralelas al eje *c* en la figura 10-8A). En consecuencia, todas las caras de la zona presentarán extinción paralela con respecto a sus líneas de mutua intersección, ya que esta última es paralela al eje de zona. Si el eje de zona y el eje de

FIGURA 10-8

**Direcciones privilegiadas para incidencia normal sobre las diferentes caras de una zona paralela al eje c si (A) el eje de zona c, coincide con un eje de vibración principal (Z) o (B) el eje de zona no coincide con un eje de vibración principal. (A) es el caso típico del cristal rómbico; (B) es el caso típico de los monoclínicos. Se presentan las elipses de intersección entre las diferentes caras y la indicatriz del cristal (esta última no está dibujada), siendo las direcciones privilegiadas sus ejes mayor y menor.**

vibración principal no coinciden, las caras de la zona en general no presentarán extinción paralela (con respecto a sus intersecciones). Por ejemplo, de los planos paralelos al eje *c* en la figura 10-8B, solamente (100), por ser paralelo a *Y*, presenta extinción paralela. Las otras caras presentan extinción inclinada, aumentando el ángulo de extinción *T* tanto más cuanto más cerca están los planos de ser paralelos a la cara (010). Ya que la cara (010) es paralela al plano sombreado que contiene los ejes *Z* y *c*, el ángulo *T* para esta cara es igual a $Z \wedge c$ (leyéndose este símbolo como «ángulo entre *Z* y

*c*»). El ángulo *T* para la cara (010) tiene de este modo un mayor significado que los ángulos de extinción para las otras caras en la figura 10-8B ya que un ángulo entre un eje de vibración principal y un eje cristalográfico puede ser usado en la identificación de un mineral. La determinación de $Z \wedge c$, por ejemplo, es de gran utilidad en la identificación óptica de variedades individuales de piroxenos y anfíboles.

En los cristales biáxicos la exfoliación o los planos cristalinos más corrientemente observados, aparecen generalmente en zonas paralelas a los ejes cristalográficos *a*, *b* y *c*. De este modo, en el sistema ortorrómbico, debido a que los tres ejes coinciden con los ejes de vibración principal, presentan

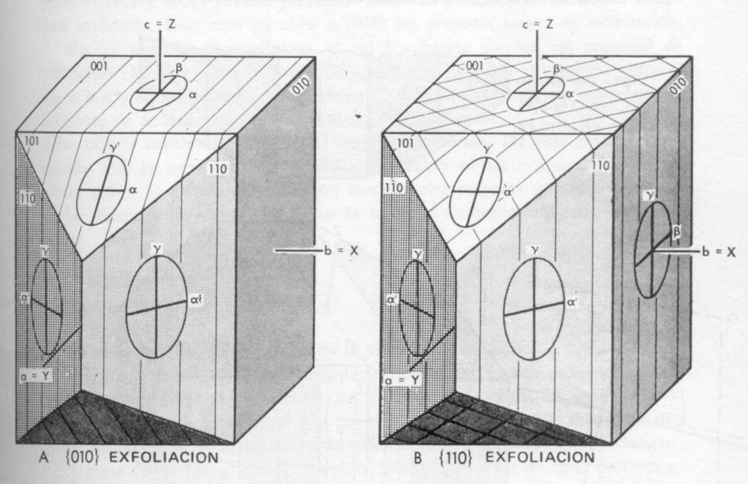



FIGURA 10-9

**Tipos de extinción para la incidencia normal de luz sobre las diferentes caras de un cristal ortorrómbico si (A) el cristal tiene una dirección de exfoliación paralela a (010) o (B) tiene dos direcciones de exfoliación (110) y (1$\bar{1}$0). Las trazas de la exfoliación sobre las otras caras del cristal y, en el caso de (B), en cada una, se han representado por líneas finas.**

con más frecuencia extinción paralela que extinción inclinada (esta última se observa en cristales ortorrómbicos, solamente en caras que no son paralelas a ejes cristalográficos). Ahora bien, en los cristales monoclínicos, únicamente el eje *b* coincide con uno de los ejes principales de vibración. De este modo la extinción paralela puede darse únicamente para exfoliaciones o caras de cristal pertenecientes a una zona paralela al eje *b*, mientras que la extinción inclinada aparece en caras de cualquier otra zona. Así pues, en los cristales monoclínicos la extinción inclinada es más frecuente que en los orto-

rrómbicos. Para los cristales triclínicos, como ninguno de los ejes principales de vibración coincide con los cristalográficos, únicamente se observa extinción inclinada. Por el mismo motivo se puede observar extinción simétrica en cristales ortorrómbicos y, en menor extinción, en cristales monoclínicos, pero no en cristales triclínicos.

Como ejemplo, consideremos un cristal ortorrómbico con una exfoliación {010} (fig. 10-9A). Obsérvese que, con respecto a las trazas de exfoliación en cada cara, la extinción paralela podría observarse si el grano se apoyase sobre un plano paralelo a (001), (101), (1$\bar{1}$0), (110), (10$\bar{1}$), etc. Para un mineral ortorrómbico que poseyera una exfoliación {110} prismática (figura 10-9B), las trazas de los planos de exfoliación (110) y (110), en las otras

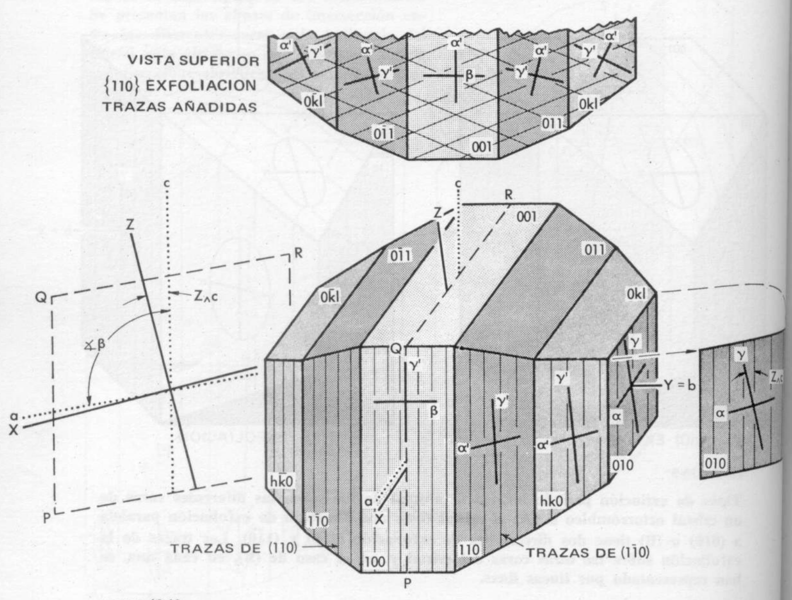



FIGURA 10-10

**Variación en el tipo de extinción para un cristal monoclínico que posee exfoliación prismática {110} y que está cortado según un plano paralelo a ella. Para una lámina cortada paralelamente al plano (100), el cristal presentaría extinción paralela; para otra tallada paralela al plano (001), el cristal presentará extinción simétrica. En la mayor parte de los casos —por ejemplo, planos (110), (hk0), (010), (0kl) y (011)— se podría observar extinción inclinada, aumentando el ángulo de extinción para los diferentes planos cuanto más próximos están de ser paralelos a (010). Para (010) esta extinción es igual al máximo valor y corresponde al Z ∧ c para el caso ilustrado. Para mayor sencillez las trazas de la exfoliación {110} en las caras (0$\bar{k}$l), (0$\bar{1}$1), (001), (011), y (0kl) se han omitido en el dibujo inferior.**

caras y en cada una de ellas, indica que podría observarse extinción paralela en las caras $(1\bar{1}0)$, (110) y (010) mientras que se podría observar extinción simétrica si el cristal se apoyase en (001), (101) o $(10\bar{1})$.

Para una exfoliación {110} en un cristal monoclínico (fig. 10-10), la extinción paralela se podría observar solamente si el grano se apoya en (100); simétrica, si lo hace en (001). Si el grano se apoya en cualquier otra cara, aparece la extinción inclinada. De este modo las extinciones paralela y simétrica en los cristales monoclínicos son excepciones en lugar de reglas. Si el cristal en la figura 10-10 tiene exfoliación {010} además de {110}, la traza de esta exfoliación {010} se puede dibujar sobre los otros planos. Los planos (100) y (001) podrán presentar extinción paralela, los restantes la tienen inclinada. Una cara paralela a (010) no presenta trazas de exfoliación.

En los cristales monoclínicos, el eje *b* coincide con un eje principal de vibración (*X*, *Y* y *Z*) para todas las longitudes de onda. El ángulo entre el eje *a* o *c* y el eje de vibración principal más próximo, varía sin embargo débilmente de acuerdo con la longitud de onda utilizada; $c \wedge Z$, por ejemplo, debe diferir débilmente para cada longitud de onda. De este modo, suponiendo que la traza de una exfoliación paralela al eje *c* aparece sobre un plano (010), el ángulo de extinción medido con respecto a esta traza debe variar ligeramente de acuerdo con la longitud de onda utilizada para iluminar.

## Signo de la elongación

La identidad del eje principal de la vibración más próximo al eje de zona a la que dos o más planos de exfoliación o cristalinos son paralelos, puede frecuentemente determinarse observando el tipo de elongación para los cristales o fragmentos. Supóngase que las características cristalográficas son dos direcciones de casi igual facilidad de exfoliación, de tal modo que se desarrollen agujas cuando se golpee y rompa el mineral. Si el eje de zona corresponde a *X*, las agujas, sin tener en cuenta el plano en el que se apoyen, presentan elongación negativa (fig. 10-11A); si corresponde a *Z*, las agujas presentan elongación positiva en cualquier orientación (fig. 10-11B); y por último, si el eje de zona corresponde a *Y*, la elongación puede ser positiva o negativa dependiendo del plano en que se apoya la aguja (fig. 10-11C). De este modo en una montura de polvo, si todas las agujas presentan elongación negativa *X* debe estar muy cerca de ser paralelo al eje longitudinal de la aguja; si todas presentan elongación positiva, *Z* debe estar muy próximo a ser paralelo a sus respectivos ejes, mientras que si algunas agujas presentan elongación positiva y otras negativa —o sea la elongación es ( ± )— *Y* estará muy próximo a ser paralelo a sus ejes longitudinales.

Para los cristales de forma aplanada o para los fragmentos producidos por exfoliación, el eje principal de vibración más próximo a la perpendicular de la placa puede determinarse en el borde del campo visual. En una montura de polvo, debido a que los granos se apoyan en sus superficies planas,

no es posible distinguir los bordes, pero en las secciones delgadas cortadas según planos generalmente orientados —por ejemplo láminas de arcilla— es posible verlo. Si $X$ es perpendicular a las placas (como ocurre en el caso de las micas, glauconita, cloritas, vermiculita, etc.) las secciones transversales

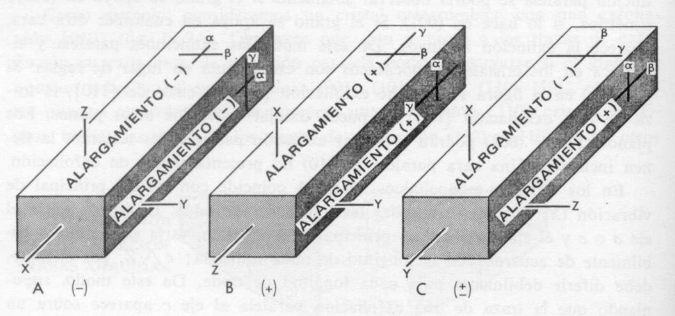



FIGURA 10-11

**Tipos de elongación en cristales (o en fragmentos de exfoliación) de minerales biáxicos. (A) Cristal elongado paralelamente a X, por lo tanto es la longitud rápida (elongación negativa) independiente de la cara sobre la que se apoya. (B) Cristal alargado paralelamente a Z; de este modo lo es a la longitud lenta (alargamiento positivo) independiente de la cara alargada sobre la que repose. (C) Cristal alargado paralelamente a Y, de este modo aparece la longitud rápida (alargamiento negativo) si el cristal descansa en el plano del modo que se presenta en el dibujo, pero aparecerá la longitud lenta (alargamiento positivo) si se apoya en la cara sombreada. El alargamiento se representa por (±).**

de las placas presentarán siempre elongación positiva. O de otro modo, si $Z$ es perpendicular a las placas, las secciones transversales siempre presentarán elongación negativa. Ahora bien, si $Y$ es perpendicular a la lámina de este mineral, algunas secciones presentarán elongación ( + ) y otras elongación ( — ) lo que depende de si la dirección está cortada más paralelamente a $Z$ que a $X$ (fig. 10-12).

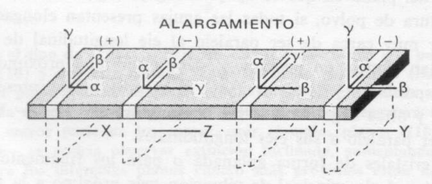



FIGURA 10-12

**Intersección entre una sección delgada de una roca y láminas (no sombreadas) con orientaciones ópticas diferentes.**

## ABSORCIÓN Y PLEOCROÍSMO

Con la identificación de un eje particular, $X$, $Y$ o $Z$, como una de las direcciones privilegiadas, el cristal se orienta con esta dirección paralela al polarizador con el fin de medir, como previamente se ha descrito, el índice principal ($\alpha$, $\beta$ o $\gamma$) asociado con esta dirección. Al mismo tiempo, el color transmitido del cristal para la luz que vibre paralela a $X$, $Y$ o $Z$ podría observarse y anotarse. Una variedad de hiperstena, si es en cristales de 0,33 mm de espesor presenta el pleocroísmo siguiente: $X$ = rojo, $Y$ = amarillo, $Z$ = = azul. Es obvio que el grado de absorción de las diferentes longitudes de onda de la luz blanca en la hiperstena varía según que la luz vibre paralela a los ejes principales de vibración $X$, $Y$ o $Z$. Para expresar las variaciones de los coeficientes de absorción $k_x$, $k_y$ y $k_z$ con la longitud de onda de un modo semejante a la figura 8-23 se necesitan tres curvas particulares. Para expresar el hecho de que, en conjunto, la absorción de toda longitud de onda es mayor para la luz que vibra, por ejemplo, paralela a $Y$, más pequeña si vibra paralela a $X$, y mínima si vibra paralela a $Z$, se acostumbra a escribir $A_y > A_x > A_z$ o sencillamente $Y > X > Z$.

Las direcciones de vibración correspondientes a los índices $\alpha'$ o $\gamma'$ se asocian generalmente con absorciones o colores transmitidos intermedios entre los correspondientes $\alpha$ y $\beta$ o $\beta$ y $\gamma$, respectivamente. Por ejemplo para cristales de hiperstena antes citados, el color transmitido por una dirección de vibración $\alpha'$, puede variar entre rojo anaranjado y amarillo anaranjado. De acuerdo con la proximidad del valor particular, $\alpha'$ es a $\alpha$ o $\beta$ respectivamente. El color transmitido asociado con $\gamma'$, por otra parte, podría variar desde azul verdoso (si $\gamma'$ es prácticamente igual a $\gamma$) hasta amarillo verdoso (si $\gamma'$ excede en poco a $\beta$).

## DATOS ANOTADOS

Una manera de reseñar los datos obtenidos —que también sirve como ficha para contrastar las propiedades ópticas medidas— se presenta en el apéndice III (pág. 311).

## IDENTIFICACIÓN MINERAL

Si $\alpha$, $\beta$ y $\gamma$ han sido medidos de un modo preciso en un mineral biáxico desconocido, la especie puede, generalmente, identificarse consultando las figuras y tablas del apéndice II (pág. 281 y sig.).

# 11

# Solución de problemas ópticos por medio de proyecciones

Del mismo modo que cualquier problema cristalográfico que implica relaciones angulares entre líneas y planos, pueden solucionarse rápidamente muchos problemas ópticos, bien con ayuda de la proyección ciclográfica, o bien por la estereográfica, íntimamente ligada a aquélla. Previamente a su discusión, es necesario analizar la proyección de líneas y planos sobre una superficie esférica, ya que ambas proyecciones, ciclográfica y estereográfica, están genéticamente ligadas a la proyección sobre una esfera.

## PROYECCIÓN SOBRE UNA ESFERA

Considérense los siguientes elementos geométricos que pasan a través del centro de una esfera de referencia (fig. 11-1A): 1) un plano de orientación general; 2) una línea (*OP*) perpendicular a este plano, y 3) una línea (*OR*) dentro de este plano. Sus intersecciones con esta esfera son, para el plano, un círculo máximo (1) y, para cada una de las dos líneas, un punto, llamado también polo. Tales intersecciones representan las *proyecciones directas* de los elementos geométricos considerados sobre la esfera; el término «proyección directa» indica que cada elemento geométrico fue prolongado hasta intersectar la esfera.

Por el contrario, un elemento geométrico dado puede representarse también recíprocamente. Por definición, esto significa la aparición del otro elemento geométrico que es perpendicular al elemento dado; la intersección de este elemento perpendicular con la esfera representa la proyección recíproca (o polar) del elemento dado. Por ejemplo, el único elemento geométrico perpendicular al plano *A* en la figura 11-1A es la línea *OP*. En consecuencia, el punto de intersección de la línea *OP* con la esfera —o sea, *el polo P*—, re-

(1) Un círculo máximo puede definirse como el arco de intersección de la esfera con un plano que pasa por el centro de ésta.

presenta la proyección recíproca o polar del plano *A*. Inversamente, el mismo elemento geométrico perpendicular a la línea *OP* es el plano *A*. En consecuencia, la intersección de este plano con la esfera —o sea, el círculo máximo de trazos de la figura 11-1A— representa la proyección recíproca de la línea *OP*.

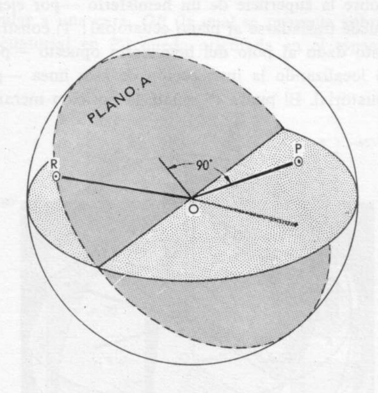



FIGURA 11-1 A

**El círculo máximo a trazos y los puntos R y P representan respectivamente la proyección directa del plano A, de las líneas OR y OP, sobre la esfera de referencia. Puesto que el plano A y la línea OP son perpendiculares entre sí, el círculo máximo a trazos podría representar la proyección recíproca (polar) de la línea OP; es decir P puede considerarse proyección recíproca del plano A.**

Resumiendo: 1) un plano o cara de un cristal se proyecta directamente sobre una esfera como un círculo máximo y recíprocamente como un polo, en tanto que, 2) una línea o un eje cristalino se proyecta directamente como un polo y recíprocamente como un círculo máximo. (En cada tipo de proyección, el elemento geométrico que corta a la esfera debe pasar necesariamente por el centro de ella.)

## PROYECCIONES CICLOGRÁFICAS Y ESTEREOGRÁFICAS

### Relación con la proyección esférica

Desgraciadamente, una esfera no puede imprimirse sobre un papel —esto implica una grave desventaja para la comunicación de ideas—. Ahora bien, existen varios métodos para trasladar los puntos o los círculos máximos desde una superficie esférica a un plano. En el caso de las proyecciones ciclográficas y estereográficas, las cuales son suficientemente convenientes para

resolver problemas de cristalografía óptica, este plano coincide con el plano ecuatorial de una esfera (punteado en la figura 11-1A). Se le llama a menudo plano de proyección y divide a la esfera en un hemisferio superior y uno inferior. La línea perpendicular a este plano ecuatorial (*UL* en la figura 11-1B) intersecta en un polo superior (*U*) y en uno inferior (*L*).

Un punto sobre la superficie de un hemisferio —por ejemplo, *P* en la figura 11-1B— puede trasladarse al plano ecuatorial: 1) construyendo una línea que una el punto dado al polo del hemisferio opuesto —por ejemplo la línea *LP*—, y 2) localizando la intersección de esta línea —por ejemplo *P′*— con el plano ecuatorial. El punto *P′* señala la posición meramente proyectada

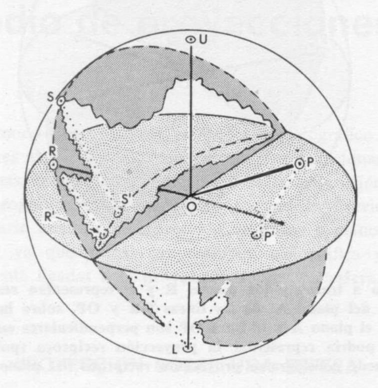



FIGURA 11-1 B

**Paso de los puntos desde la superficie de la esfera a su plano ecuatorial (punteado). Cada punto está unido al polo del hemisferio opuesto por una línea de puntos. Esta línea de puntos atraviesa al plano ecuatorial en la posición proyectada del punto en este plano; R′, S′ y P′ son ejemplos. El punto P′ es la proyección recíproca del plano (sombreado) A.**

del punto *P*. Un círculo máximo sobre la esfera puede proyectarse sobre el plano ecuatorial considerando puntos individuales de él —por ejemplo, *R* y *S*— y obteniendo sus proyecciones (*R′* y *S′*).

Por consiguiente, el punto *P′* en la figura 11-1B señala la proyección en el plano ecuatorial del punto *P*, el cual, por otra parte, puede representar: 1) la proyección directa de la línea *OP*, o 2) la proyección recíproca o polar del plano *A*. Dependiendo de su significado, el punto *P′* puede representar la proyección *ciclográfica* de la línea *OP* (1.$^{er}$ caso) o la proyección *estereográfica* del plano *A* (2.º caso). La única diferencia entre estas dos proyecciones es que la ciclográfica procede de una proyección directa, mientras que la estereográfica procede de una proyección recíproca de un plano o línea sobre la esfera. Análogamente, la curva de trazos en el plano ecuatorial punteado

de la figura 11-1B puede representar la proyección ciclográfica del plano *A* o la estereográfica de la línea *OP*.

## Coordenadas de un punto

La perpendicular a una cara, *OP* (la cual se proyecta sobre la esfera en *P* y en el plano ecuatorial en *P'*) queda orientada en el espacio si se definen

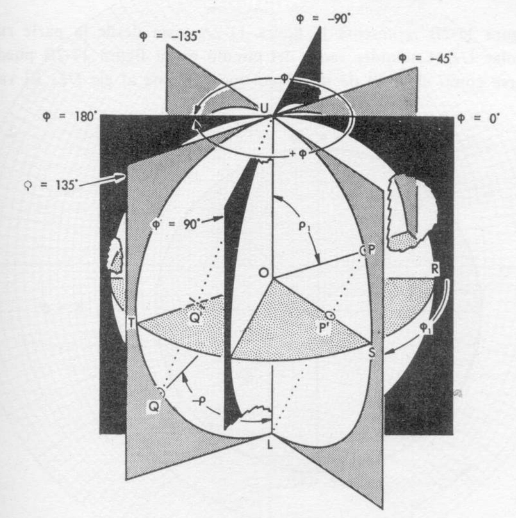



FIGURA 11-2 A

**Sistema de coordenadas esféricas, referido al eje polar UL. Los planos sombreados se cortan según UL formando diferentes ángulos con el plano de referencia fuertemente sombreado que contiene a R. Estos ángulos son las coordenadas $\phi$ (phi) de estos planos; los valores negativos de $\phi$ se encuentran midiéndolos en sentido contrario al del avance de las agujas del reloj desde el plano de referencia; los valores positivos se encuentran midiendo los ángulos $\phi$ en el sentido de avance de las agujas. Una línea —por ejemplo, OP— está determinada en el espacio si: 1) está determinado el valor $\phi$ del plano que la contiene, y 2) se conoce su ángulo con la línea UL; o sea, su ángulo $\rho$ (rho). En otras palabras, si $\phi$ y $\rho$ tienen valores específicos, la línea OP queda fijada en el espacio.**

para ella dos coordenadas angulares, $\phi$ (phi) y $\rho$ (rho) (fig. 11-2A). El valor de $\phi$ indica el ángulo entre dos planos: uno (que está débilmente sombreado en la figura 11-2A) contiene la línea *OP* y el eje *UL*, en tanto que el otro (fuertemente sombreado) es un plano de referencia previamente elegido que

también contiene *UL*. El valor de $\rho$ indica el ángulo entre *OP* y el eje polar *UL*. El valor de $\rho$ se considera positivo si se mide desde el polo superior —por ejemplo, para *OP*— y negativo si se mide desde el polo inferior —por ejemplo, el medido para *OQ*—. Por ejemplo (fig. 11-2A), las coordenadas de la línea *OP* son $\phi_1 = 45°$, $\rho_1 = 62°$ (aproximadamente). Las cuales para la línea *OQ* son: $\phi = 135°$, $\rho = -65°$ (aproximadamente).

## Proyección de puntos

La figura 11-2B representa la figura 11-2A vista desde la parte superior del eje polar *UL*. Cualquier radio del círculo en la figura 11-2B puede casi considerarse como el perfil de un plano que contiene al eje *UL*. El valor de

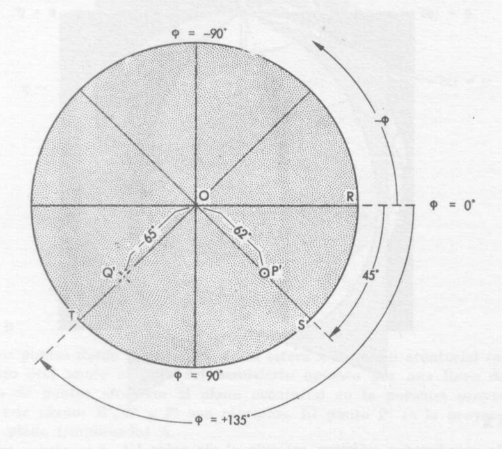



FIGURA 11-2 B

**Plano punteado (A) visto desde el extremo superior del eje polar UL. El punto P' tiene las coordenadas $\phi = 45°$ y $\rho = 62°$.**

$\phi$ para tales planos puede medirse con un transportador; es el ángulo entre este radio y *OR*, donde *OR* en la figura 11-2B representa la traza del plano de referencia para el cual $\phi$ se supone igual a 0 grados. Los ángulos $\phi$ positivos son medidos en el sentido de avance de las agujas de un reloj a partir de *OR;* los negativos en sentido contrario. El radio *OS* en la figura 11-2B, por ejemplo, representa el perfil de un plano que contiene todas las direcciones (de las cuales *OP* en la figura 11-2A es una de ellas) para las cuales $\phi$ es igual a 45°. Análogamente, el radio *OT* representa el perfil de un plano que contiene todas las direcciones para las cuales $\phi$ vale 135 grados. Según tales ra-

dios (por ejemplo *OS* en la figura 11-2B) la distancia *r*, según la cual un punto (*P'*) está separado del centro del círculo, aumenta con $\rho$ ya que:

$$r = R \operatorname{tg} \frac{\rho}{2} \qquad \text{(Ec. 11-1)}$$

donde *R* es igual al radio de la esfera de referencia (*OS* en la figura 11-2). Obsérvese que si $\rho$ vale 0 grados, *P'* coincide con el centro del círculo (el cual pertenecerá a cualquier valor de $\phi$ ya que *P'* será común a todos los radios de la circunferencia). Si $\rho$ vale 90°, *P'* pertenece a la circunferencia. Para valores de $\rho$ intermedios entre 0 y 90°, *P'* caería sobre la recta *OS*. La distancia contada desde el centro del círculo para un valor particular de $\rho$ puede determinarse a partir de cualquiera de los cuatro radios que terminan en los puntos *E, S, O* y *N* de la falsilla estereográfica de Wulff en la figura 11-3, pues cada radio queda dividido en intervalos de 2 grados de $\rho$.

## PLANTILLA DE PROYECCIÓN ESTEREOGRÁFICA

### Descripción y significado

La serie de curvas que unen los puntos *N* y *S* de la plantilla de proyección estereográfica (fig. 11-3) representan círculos máximos —o sea, la proyección ciclográfica de una familia de planos que se intersectan según la línea *NS* (fig. 11-4A)—. El intervalo angular entre ellas es de 2 grados, pero en la figura 11-4A se han trazado con intervalos de 15 grados. Con una sola excepción, estos planos se han omitido en el cuadrante superior derecha de la esfera, para presentar mejor sus proyecciones ciclográficas en el plano ecuatorial. El círculo máximo a trazos según el cual el plano transparente corta a la esfera, se proyecta en detalle sobre el plano ecuatorial.

Una segunda serie de curvas sobre la plantilla son transversales a los círculos máximos descritos. Para comprender su significado, supongamos el semicírculo *SFN* (fig. 11-4B) que contiene 90 radios igualmente separados, unos cuantos de ellos —por ejemplo *OS, OA, OB, OC,* etc.— están dibujados en la figura 11-4B. Si el semicírculo *SFN* gira en torno a la línea *NS* sus radios trazan una serie de círculos menores ([2]) (a trazos) sobre la superficie esférica. Si cada punto de estos círculos menores se proyecta sobre el plano punteado, resultan las curvas de trazo continuo de la figura 11-4B.

### Empleo práctico

Saque del libro la figura 11-3 y colóquese sobre un cuadrado de cartón fuerte; atraviésese su centro con un alfiler cuya punta se haya afilado y adel-

([2]) Un círculo menor puede definirse como todo círculo sobre la superficie esférica cuyo radio es menor que el de la esfera.

gazado (fig. 11-5A); en una cuartilla de papel de calcar dibújense dos líneas que se corten perpendicularmente. Agujeréese su intersección con una aguja, numérense los extremos de las rectas así: $\phi = 0°$, $90°$, $-90°$, y $180°$, y en-

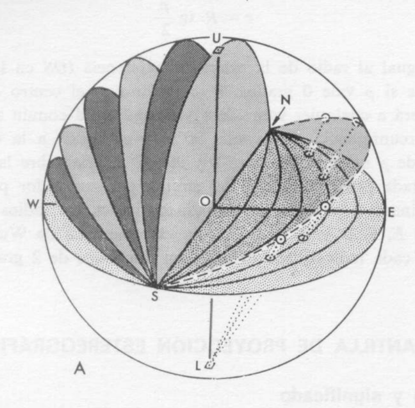
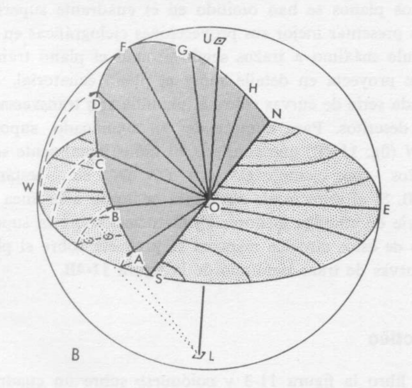



FIGURA 11-4

**(A) Representación de los círculos máximos que unen los puntos N y S en la figura 11-3. (B) Representación de los círculos menores de la figura 11-3. Si el plano sombreado gira en torno al eje NS, las intersecciones de las líneas dentro de él (OA, OB, OH) con la esfera describen círculos menores (a trazos) en ella. Si todos los puntos en estos círculos menores se proyectan sobre el plano ecuatorial por el método estereográfico (como se puede ver en dos puntos del círculo menor B) resultan los círculos menores de la falsilla.**




cájese este papel de calco en el alfiler de la plantilla de proyección (figura 11-5B) utilizando el agujero hecho previamente con la aguja como guía. Para señalar un punto $P$ ($\phi_1 = 30°$, $\rho_1 = 75°$) sobre el papel de calco, gí-

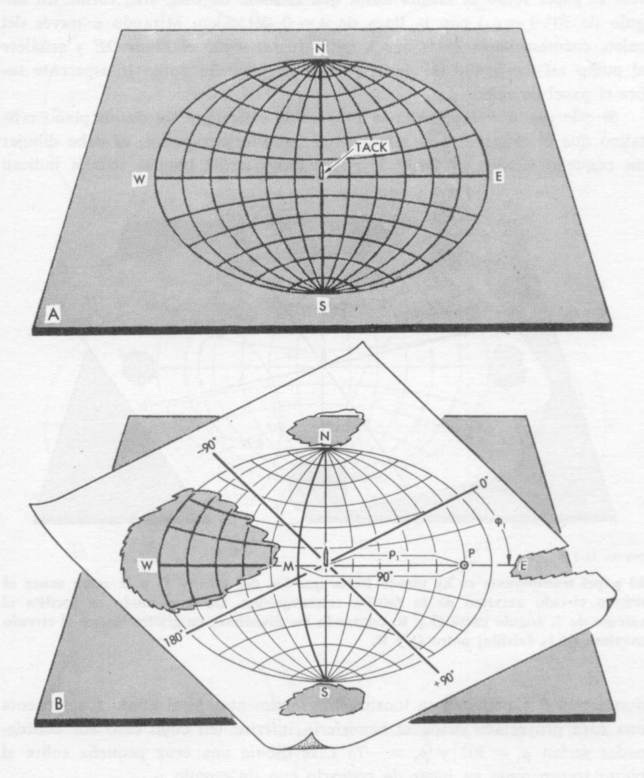



FIGURA 11-5

**(A) Falsilla (sombreada en gris a efectos ilustrativos) preparada para ser utilizada; tiene inserta una aguja puntiaguda atravesando su centro. (B) Inserción de la aguja de la plantilla en la intersección de dos líneas perpendiculares trazadas sobre un papel de calco. Los extremos de estas líneas se designan con sus valores de $\phi$ (0°, 90°, 180° y —90°). El calco ha sido guiado sobre la falsilla hasta que el diámetro OE de ésta forma un ángulo $\phi$ con la línea de 0° del papel, sirviendo como graduador la circunferencia de la plantilla. Un punto P cuyas coordenadas son $\phi_1$ y $\rho_1$, puede situarse sobre el calco contando un número de grados igual a $\rho_1$ desde la aguja hacia E. Si P representa el polo de un plano proyectado estereográficamente, el punto M, que está a 90° de P sobre el diámetro OE, señala el círculo máximo NMS, que es la proyección ciclográfica —o sea, la intersección con la esfera— del plano cristalino.**

rese el papel sobre la falsilla hasta que el radio de ésta, *OE*, forme un ángulo de 30° ($= \phi_1$) con la línea de $\phi = 0$ del calco. Mirando a través del calco, cuéntese hasta 75° ($= \rho_1$), hacia fuera, según el radio *OE* y señálese el punto así localizado (es decir, *P*) con un pequeño punto transparente sobre el papel de calco.

Si este punto *P* representa la proyección estereográfica de un plano cristalino que es tangente a la esfera en el hemisferio superior, se debe dibujar un pequeño círculo en torno al punto transparente (ambas señales indican

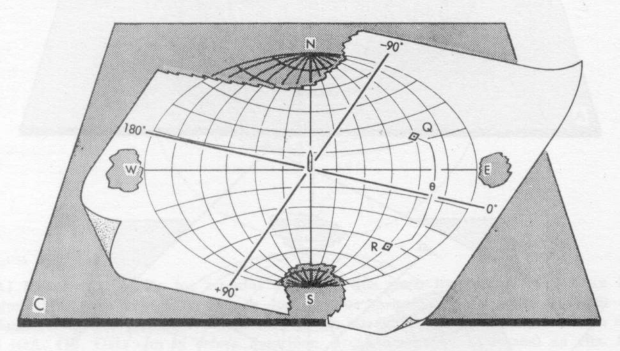



FIGURA 11-5 C

**El papel transparente se ha girado hasta que los dos puntos Q y R están sobre el mismo círculo máximo de la falsilla estereográfica. De este modo se facilita el cálculo de $\theta$, ángulo entre Q y R, contando las divisiones en grados (sobre el círculo máximo de la falsilla) entre Q y R.**

donde está *P* y permiten su localización fácilmente). Si el punto *P* representa una cara proyectada desde el hemisferio inferior (en cuyo caso sus coordenadas serían $\phi_1 = 30°$ y $\rho_1 = -75°$), se dibuja una cruz pequeña sobre el punto transparente en lugar de rodearlo con un círculo.

Para encontrar la proyección ciclográfica de un plano cristalino, si se conocen sus coordenadas $\phi$ y $\rho$, bastará situar sencillamente su polo *P* del modo anteriormente descrito. El punto *P* estará ahora sobre el diámetro *OE* de la falsilla (fig. 11-5B). Se cuentan 90° desde *P* a lo largo del diámetro *OE* de la falsilla, ya que puede verse por transparencia. El punto así localizado será la intersección de un círculo máximo con *OE;* este círculo máximo puede trazarse sobre el papel de calco (véase la curva de trazo fuerte *NMS* en la figura 11-5B) y representa así la proyección ciclográfica del plano cuyo polo es *P*.

Un polo indicador de una dirección o eje (además de la cara perpendicular a estos elementos) de un cristal, puede proyectarse ciclográficamente a partir de sus coordenadas $\phi$ y $\rho$ del mismo modo que se proyectó el polo *P* de la cara (pág. 243). En este caso se dibujará un pequeño cuadrado en-

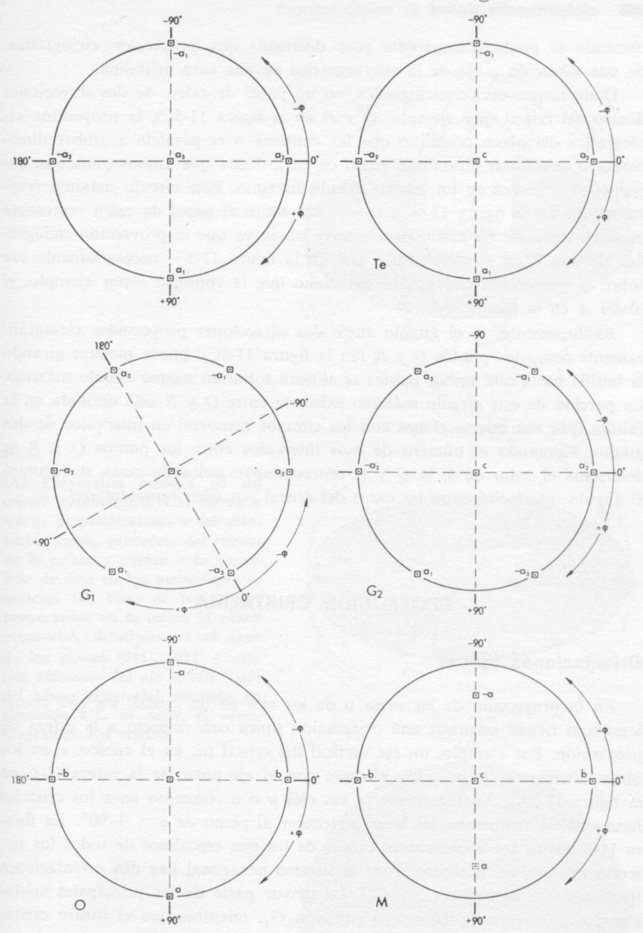



FIGURA 11-6

**Coordenadas tipo para los ejes cristalinos (proyectados ciclográficamente) del sistema cúbico (I), tetragonal (Te), hexagonal ($G_1$ o $G_2$), rómbico (O), y monoclínico (M). Las coordenadas del extremo positivo del eje a en los cristales monoclínicos son: $\phi = 90°$ y $\rho = B - 180°$. Como $\beta$ es obtuso, el extremo positivo viene forzosamente proyectado sobre el hemisferio inferior, como puede verse en la figura 11-7 A. Para indicar esta circunstancia, se ha señalado la proyección ciclográfica del extremo positivo de a con un cuadrado a trazos en vez de serlo de trazo continuo.**

cerrando el punto transparente para distinguir esta proyección ciclográfica, de una dirección o eje de la estereográfica de una cara cristalina.

Dada la proyección ciclográfica, en un papel de calco, de dos direcciones dentro del cristal (por ejemplo, $Q$ y $R$ en la figura 11-5C), la proyección ciclográfica del plano cristalino que las contiene o es paralelo a ambas direcciones o se obtiene girando el papel de calco hasta que ambos puntos se superponen a la vez en un mismo círculo máximo. Este círculo máximo (curva $NQRS$ en la figura 11-5C), si se traza sobre el papel de calco representa el plano deseado. La razón para esto es obvia ya que la proyección ciclográfica de una línea —por ejemplo, $OR$ en la figura 11-1— necesariamente cae sobre la proyección ciclográfica del plano que la contiene —por ejemplo, el plano $A$ en la figura 11-1—.

Análogamente, $\theta$, el ángulo entre dos direcciones proyectadas ciclográficamente como los puntos $Q$ y $R$ (en la figura 11-5C), puede medirse girando la falsilla hasta que ambos puntos se alinean sobre un mismo círculo máximo. La porción de este círculo máximo existente entre $Q$ y $R$ está dividida en la falsilla (por sus intersecciones con los círculos menores) en intervalos de dos grados. Contando el número de esos intervalos entre los puntos $Q$ y $R$ se determina el valor de $\theta$. Si $Q$ y $R$ representaban polos de caras, $\theta$ denotará el ángulo interfacial entre las caras del cristal por ellos representadas.

## PROYECCIÓN CRISTALINA

### Orientaciones típicas

En la proyección de las caras o de los ejes de un cristal, los ejes cristalográficos tienen asignada una orientación típica con respecto a la esfera de proyección. Por ejemplo, un eje vertical del cristal ($a_3$ en el cúbico, $c$ en los otros sistemas) debe coincidir siempre con el eje polar de la esfera ($UL$ en la figura 11-2A). Análogamente, a sus ejes $a$ o $a_1$ (excepto para los cristales hexagonales) siempre se les hace pertenecer al plano de $\phi = +90°$. La figura 11-6 ilustra las orientaciones típicas de los ejes cristalinos de todos los sistemas excepto del triclínico. Para el sistema hexagonal hay dos orientaciones (generalmente llamadas $G_1$ y $G_2$). La mayor parte de los principales cristalógrafos americanos prefieren la posición $G_1$, mientras que el ilustre cristalógrafo alemán V. Goldschmidt emplea la posición $G_2$, algunas veces de un modo exclusivo, en sus publicaciones. La posición $G_2$ guarda mayores analogías con las posiciones típicas de los otros sistemas.

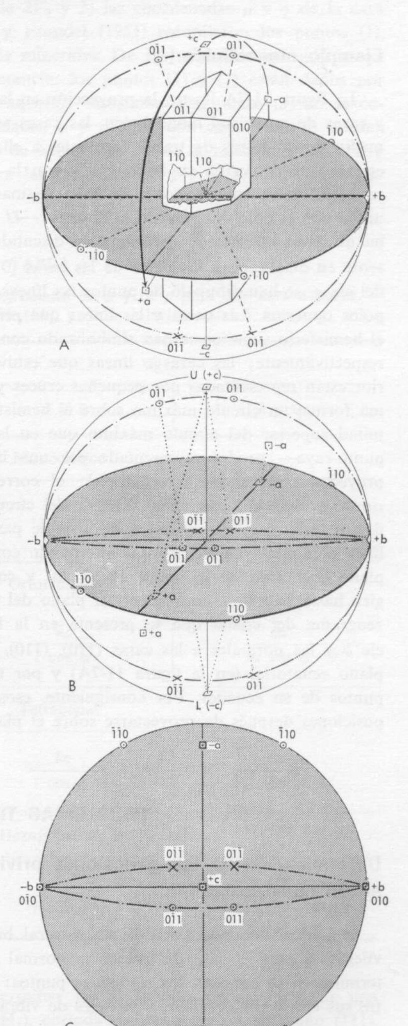



FIGURA 11-7

**(A) Proyección esférica de un cristal monoclínico. Las líneas a trazos perpendiculares a las diferentes caras, proceden del centro de la esfera y cortan a la superficie de ésta en los puntos que se indican. (B) Paso de los puntos proyectados en la esfera al plano ecuatorial, detallado en el caso de los planos (0$\bar{1}\bar{1}$), (01$\bar{1}$) y ambos extremos del eje a. (C) Vista del plano ecuatorial mirando en dirección UL, es decir, el «estereograma» del cristal.**

## Ejemplo monoclínico [3]

La figura 11-7A ilustra la proyección en la esfera fundamental de los ejes y caras de un cristal monoclínico, las caras se proyectan recíprocamente por medio de las líneas de trazos (normales a ellas) que parten del centro de la esfera y terminan en su intersección con la superficie esférica. En la figura 11-7B estas intersecciones se han plasmado en el plano ecuatorial por unión con el polo del hemisferio opuesto —*U* o *L*, en su caso—. Para ello, se ha utilizado un método (previamente discutido; véase pág. 241) que se presenta en detalle para los polos de las caras (011) y ($01\bar{1}$) y para los extremos del eje *a;* se han dibujado de puntos las líneas que unen estos elementos a los polos opuestos. Las caras y las líneas que primero fueron proyectadas sobre el hemisferio superior se han simbolizado con pequeños círculos y cuadrados respectivamente; las caras o líneas que estuvieron sobre el hemisferio inferior están representadas por pequeñas cruces y cuadritos a trazos. De la misma forma, un círculo máximo sobre el hemisferio superior —por ejemplo, la mitad superior del círculo máximo que en la figura 11-7A está dibujado a punto-raya— vendrá representado por una línea de punto-raya después de proyectarse en el plano ecuatorial; el correspondiente al hemisferio inferior —por ejemplo, la mitad inferior del círculo máximo a punto-raya en la figura 11-7A— se representará después de pasar el plano ecuatorial por una línea compuesta de tres puntos alternando con trazos. La figura 11-7C es el plano ecuatorial de la figura 11-7B, tal y como podría verse cuando se le gira hasta hacerle coincidir con el plano del papel; es por lo tanto el estereograma del cristal que se presenta en la figura 11-7A. Obsérvese que el eje *b* y las normales a las caras ($1\bar{1}0$), (110), (010) y ($\bar{1}10$) yacen dentro del plano ecuatorial (en la figura 11-7A) y por tanto intersectan a la esfera en puntos de su ecuador. Por consiguiente, esos puntos conservan sus mismas posiciones después de proyectarse sobre el plano ecuatorial.

## PROBLEMAS TIPO

### Determinación de las direcciones privilegiadas en un plano cristalino

Sea el plano dado (*hkl*) de un mineral biáxico. Las dos direcciones privilegiadas para el caso de incidencia normal sobre este plano se pueden determinar si se conocen los siguientes puntos: 1) las relaciones angulares entre sus ejes cristalográficos y sus ejes de vibración principales; 2) orientación

(3) Se supone que el lector comprende el significado de los índices de Miller (*hkl*), etc. y de la razón axial, $a:b:c$. Si no le resultan conocidos, puede consultar cualquier texto elemental de cristalografía o mineralogía.

de su bisectriz aguda y valor de $2V$, y 3) las coordenadas $\rho$ y $\phi$ de la cara considerada. Palache, Berman y Frondel (1951) recopilaron los puntos (1), (2) y (3) de un gran número de minerales. De los minerales que aún no se hayan considerado en esta referencia, los puntos (1) y (2) están dados por Winchel y Winchel (1951). En aquellos casos donde el punto (3) no se conozca en principio, las coordenadas $\phi$ y $\rho$ para una cara dada se pueden calcular a partir de sus índices de Miller (*hkl*) y de la relación axial $a:b:c$ por medio de las fórmulas para las tangentes de $\phi$ y $\rho$ (reunidas en la tabla 11-1).

TABLA 11-1

Fórmulas para los cálculos tangenciales de $\phi$ y de $\rho$ para una cara a partir de sus índices de Miller (*hkl*) y de la relación axial $a:b:c$

| tg $\phi$ | tg $\rho$ | |
|---|---|---|
| | $k \neq 0$ | $k = 0$ |
| **Monoclínico** | | |
| $\dfrac{hc/a + l \operatorname{sen}(\beta - 90)}{kc \operatorname{sen} \beta}$ | $\dfrac{kc}{l \cos \phi}$ | $\dfrac{hc/a + l \operatorname{sen}(\beta - 90)}{l \operatorname{sen} \phi \cos(\beta - 90)}$ |
| **Ortorrómbico** | | |
| $\dfrac{h}{ak}$ | $\dfrac{kc}{l \cos \phi}$ | $\dfrac{hc}{la \operatorname{sen} \phi}$ |
| **Tetragonal** | | |
| $\dfrac{h}{k}$ | $\dfrac{kc}{l \cos \phi}$ | $\dfrac{hc}{l \operatorname{sen} \phi}$ |
| **Hexagonal ($G_2$)** | | |
| $1{,}1547 \left( \dfrac{h}{k} + 0{,}5 \right)$ | $\dfrac{kc}{l \cos \phi}$ | $\dfrac{hc}{l \operatorname{sen}(\phi - 30)}$ |

Queremos, por ejemplo, determinar las direcciones privilegiadas de una lámina de augelita, $Al_2(PO_4)(OH_3)$, cortada paralelamente a su plano (111). Los datos que a continuación se citan se han obtenido de Palache, Bernan y Frondel (1951, pág. 871):

1) $X = b$, $Y \wedge c = -56°$, $Z \wedge c = +34°$, $\beta = 112° 27'$
2) biáxico ( + ), $2V = 51°$
3) coordenadas estereográficas para (111), $\phi = 52° 37\frac{1}{2}'$ y $\rho = 46° 18\frac{1}{2}'$

En 1) el signo negativo indica, por convenio, que un eje de vibración principal —*Y*, en este caso— aparece dentro del ángulo *agudo* entre los ejes *a* y *c;* el signo positivo indica que *Z* está dentro del ángulo *obtuso* $\beta$ entre los ejes *a* y *c*. Winchel y Winchel (1951) emplean estos signos al contrario.

Utilizando los datos arriba indicados se proyectan ciclográficamente en la figura 11-8, los ejes cristalinos (*a*, *b* y *c*), los ejes de vibración principales (*X*, *Y* y *Z*), los ejes ópticos (*A* y *B*) y el plano (111). Todos estos elementos, excepto el último, son líneas y por lo tanto se proyectan ciclográficamente

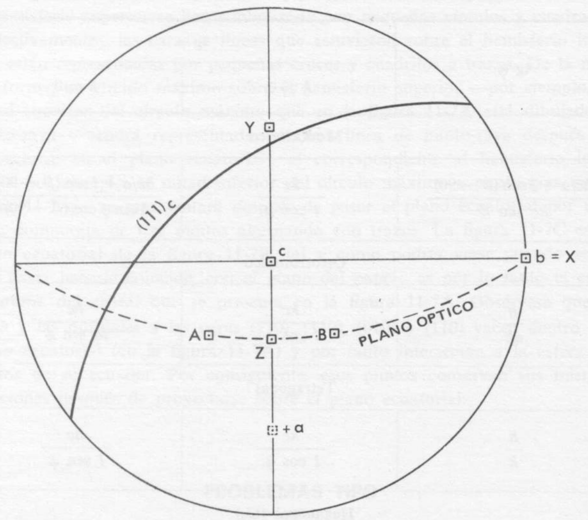



FIGURA 11-8

**Proyección ciclográfica de los ejes X, Y, Z, a, b, c y de la cara (111) de la augelita.**

como puntos. El plano óptico, *XZ*, está proyectado ciclográficamente como un círculo máximo a lo largo del cual y a partir de *Z* contando 25 $\frac{1}{2}$ grados de cada dirección, están localizados los ejes ópticos. Comoquiera que los ejes ópticos son perpendiculares a las secciones circulares de la indicatriz, la proyección ciclográfica de ambas puede localizarse utilizando los puntos *A* y *B* del modo que previamente hemos discutido (pág. 243). Los círculos máximos

resultantes (punteados y designados en la figura 11-9 por C.S.A. y C.S.B.) cortan a la proyección ciclográfica de (111) en los puntos $L_A$ y $L_B$. Estos puntos representan las proyecciones ciclográficas de dos líneas pertenecientes al plano (111) y que son también radios de las secciones circulares de la indicatriz. De este modo, si el plano (111) corta a la indicatriz en el caso de la augelita, la intersección sería una elipse en la que las líneas $L_A$ y $L_B$ representarían dos radios de igual longitud, equivalentes ambas a $\beta$ (véase el anexo de la figura 11-9). Uno de los dos semiejes de esta elipse biseca el ángulo entre las líneas $L_A$ y $L_B$ (ya que la bisectriz del ángulo entre dos radios de igual longitud en una elipse coincide forzosamente con uno de los semiejes). La proyección ciclográfica de uno de los semiejes de esta elipse será $Z'$, punto a mitad de camino (en términos de grados) entre $L_A$ y $L_B$ en el círculo máximo $(111)_c$. Si se hace coincidir un círculo máximo de la falsilla con $(111)_c$, se pueden contar 90 grados a partir del punto $Z'$ para localizar $X'$, que es la proyección ciclográfica del otro semieje de la elipse. Los semiejes $Z'$ y $X'$ de la elipse de intersección entre el plano (111) y la indicatriz son las direcciones privilegiadas para la incidencia normal de la luz sobre (111); en la figura 11-9 el más próximo a $Z$ se denomina $Z'$ y el más próximo a $X$ se le llama $X'$.

## Determinación de los ángulos de extinción

La augelita tiene una exfoliación perfecta {110} en dos direcciones: la (110) y la $(\bar{1}10)$ que pueden interesar al plano (111). Por lo tanto una lámina de augelita que presente la cara (111) o que corte paralelamente a este plano presenta dichas intersecciones como líneas o finas estrías. Los ángulos de extinción entre estas estrías y la dirección privilegiada $Z'$ para la augelita perteneciente al plano (111), se determinan proyectando ciclográficamente los planos de exfoliación (110) y $(\bar{1}10)$, utilizando las coordenadas $\phi$ dadas por Palache y colaboradores (1951, pág. 871). Los círculos máximos resultantes —en líneas de punto-raya en la figura 11-9— cortan al círculo máximo $(111)_c$ en los puntos $m_1$ y $m_2$. Estos puntos representan la proyección ciclográfica de las líneas de intersección de la exfoliación {110} con el plano (111) —o sea, la proyección ciclográfica de las trazas presentes en (111)—. Los ángulos entre $Z'$ y $m_1$ y entre $X'$ y $m_2$, contándolos en grados a lo largo del círculo máximo $(111)_c$, son, aproximadamente, 23 y 7 grados respectivamente. Por lo tanto tales valores corresponden a los ángulos de extinción para la augelita en la cara (111).

El procedimiento para determinar los ángulos de extinción de un cristal con respecto a una exfoliación particular presente en una cara (*hkl*) es como sigue: 1) determinar las direcciones privilegiadas para la cara (*hkl*); 2) localizar las trazas de exfoliación sobre (*hkl*) y 3) medir el ángulo entre estas trazas de exfoliación y las direcciones privilegiadas.

Pueden obtenerse otras informaciones sobre las propiedades ópticas de la lámina (111) de augelita estudiando la figura 11-9. Por ejemplo, contando

los grados entre $m_1$ y $m_2$, tenemos que el ángulo entre las trazas de exfoliación en la lámina (111) viene a ser de unos 60 grados. Más aún, la figura de interferencia de tal lámina es casi la de un eje óptico centrado ya que el eje *B* y la normal a la lámina (111) casi coinciden. Concretamente, el ángulo entre el eje óptico *B* y el polo de la cara (111) en la figura 11-9 es de

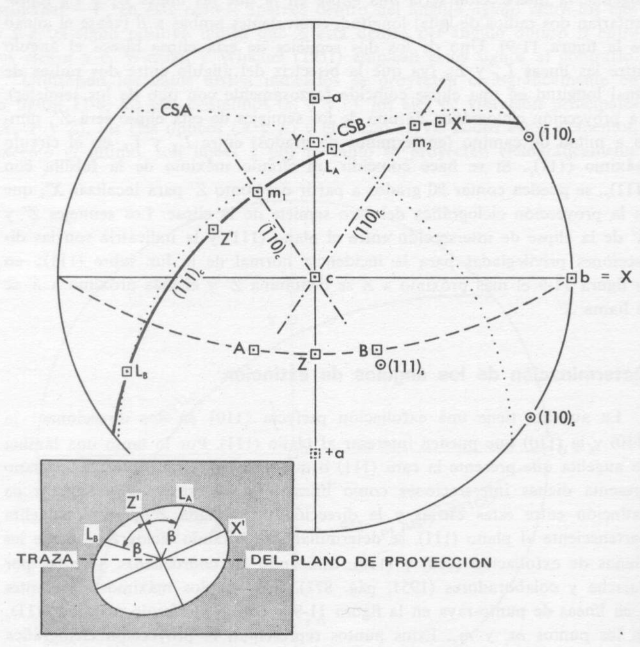



FIGURA 11-9

**Empleo de la proyección ciclográfica en la solución de problemas ópticos. Se han proyectado las direcciones ópticas y cristalográficas de la augelita. Los subíndices s y c denotan respectivamente, proyecciones estereográfica y ciclográfica. Para más detalles sobre símbolos véase el texto.**

6 grados. La luz que se desplaza según la normal a (111) emerge en el centro del campo en una figura de interferencia de un grano que se apoya en el plano (111). Por otra parte la luz que se propaga según el eje óptico *B*, emerge muy próxima al centro; aplicando el método de Tobi al melatopo que señala su punto de emergencia, estos rayos podrían localizarse sabiendo que se desplazan (dentro del cristal) formando un ángulo de 6 grados con respecto a la normal a la platina del microscopio.

## Cálculo de los índices de refracción

Puesto que las direcciones privilegiadas $X'$ y $Z'$ para la incidencia normal sobre un plano (*hkl*) se han localizado, los índices de refracción del grano para la luz que vibra paralelamente a tales direcciones puede calcularse utilizando la ecuación 9-2 (pág. 176), teniendo presente que las coordenadas $\phi$ y $\rho$ de $X'$ y $Z'$, se conocen para el cristal con «orientación óptica standard» —o sea, con Z en $\rho = 0°$ y con $X$ en $\phi = 0°$ y $\rho = 90°$—. Continuando con

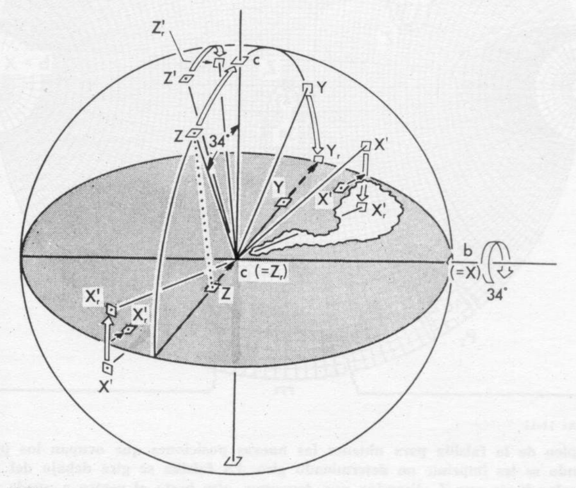



FIGURA 11-10

**Proyección esférica y, dentro del plano sombreado, ciclográfica de las direcciones ópticas X, Y, Z, X′ y Z′ mostrando su situación antes de que el cristal gire en torno al eje b 34 grados. Después de realizar esta rotación, sus posiciones son $X'_r$, $Z_r$, $Y_r$, etc.**

el ejemplo de la augelita observamos que la figura 11-9 tiene una orientación cristalográfica «standard» (véase fig. 11-6M). De este modo, tal como puede verse en la figura 11-10, el eje *c* es perpendicular al plano de proyección. Para que el eje $Z$ llegue a ser perpendicular se precisa una rotación de 34 grados del cristal en torno a su eje *b*. Durante esta rotación, las posiciones proyectadas de $Z$, $Y$, $X'$ y $Z'$ se han movido según las flechas huecas hasta sus nuevas posiciones. Obsérvese que la dirección denominada $X'$ en la figura 11-10 interseca a la vez el hemisferio inferior y el superior. Después de un giro de 34 grados en torno al eje *b*, tal como se indica por la flecha cur-

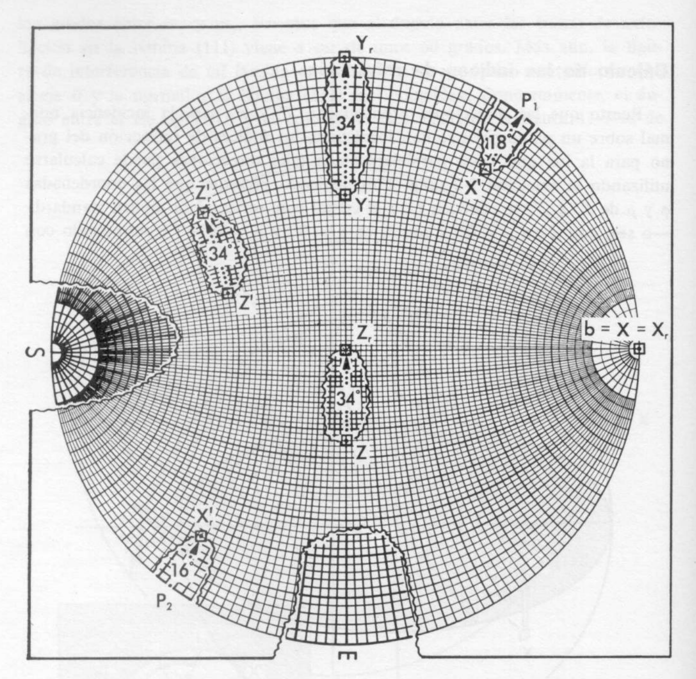



FIGURA 11-11

**Empleo de la falsilla para obtener las nuevas posiciones que ocupan los puntos cuando se les imprime un determinado giro. La falsilla se gira debajo del papel de calco hasta que Z, dirección que deseamos, gira hasta el centro y queda sobre el diámetro OE de la falsilla. La rotación de 34 grados del cristal representada en la figura 11-10 lleva Z hasta $Z_r$, Z′ se desplaza 34 grados según un círculo menor hasta $Z'_r$, y X a lo largo de un círculo menor girando 34 grados llega a $X'_r$.**

vada en la figura 11-10, esta línea $X'X'$ viene a ser $X'_rX'_r$ y ahora interseca al hemisferio superior en su superficie anterior.

En la práctica, estas nuevas posiciones después de la rotación se obtienen como sigue (fig. 11-11): 1) girando la proyección original —fig. 11-9— hasta que $Z$, dirección que debe llevarse al centro, caiga en el diámetro E-O de la falsilla estereográfica; 2) el número de grados entre $Z$ y el centro es el que debe girar el cristal para que $Z$ ocupe la posición $Z_r$, y 3) la misma rotación del cristal que hizo desplazarse $Z$ a $Z_r$, fuerza a los otros puntos ($X'$, $Z'$, $Y$) a desplazarse 34 grados según círculos menores de la plantilla estereográfica hasta sus nuevas posiciones ($X'_r$, $Z'_r$, etc.). Debido a que proyectamos única-

# Bibliografía


BAUER, N. (1949). In *Physical methods of organic chemistry* (A. Weissberger, ed.). Vol. 1, Pt. 2, págs. 1203-1214.

BIOT, J. B. (1820). Mémoire sur les lois générales..., *Mém. Acad. France, Année 1818,* III, págs. 177-384.

BOUMA, B. J. (1947). *Physical aspects of colour,* Eindhoven (Netherlands): N. V. Philips, 312 páginas.

DITCHBURN, R. W. (1952). *Light,* London: Blackie and Son, 680 páginas.

EMMONS, R. C. (1943). The universal stage, *Geol. Soc. Amer. Mem.,* 8, 205 páginas.

EMMONS, R. C. and GATES, R. M. (1948). The use of Becke line colors in refractive index determination, *Am. Mineral., 33,* págs. 612-618.

FAIRBAIRN, H. W. y PODOLSKY, T. (1951). Notes on precision and accuracy of optic angle determination with the universal stage, *Am. Mineral., 36,* págs. 823-832.

FISHER, D. JEROME (1958). Refractometer perils, *Am. Mineral., 43,* págs. 777-780.

FLETCHER, L. (1891). The optical indicatrix and the transmission of light in crystals, *Min. Mag., 9,* pág. 278.

FOSTER, W. R. (1947). Gravity-separation in powder mounts as an aid to the petrographer, *Am. Mineral., 32,* págs. 462-467.

FRESNEL, A. (1827). Mémoire sur la double réfraction, *Mém. Acad. France,* VII, págs. 45-176.

HARDY, A. C. y PERRIN, F. H. (1932). *The principles of optics,* Nueva York: McGraw-Hill, 632 páginas.

JOHANNSEN, ALBERT (1918). *Manual of petrographic methods,* Nueva York: McGraw-Hill, 649 páginas.

KAMB, W. BARCLAY (1958). Isogyres in interference figures, *Am. Mineral., 43,* págs. 1029-1067.

LARSEN, ESPER S. y BERMAN, HARRY (1934). The microscopic determination of the nonopaque minerals. *U. S. Geol. Surv.,* Bull. 848.

LONGHURST, R. S. (1957). *Geometrical and physical optics,* Londres: Longmans, Green, 534 páginas.

LOUPEKINE, I. S. (1947). Graphical derivation of refractive index $\epsilon$ for the trigonal carbonates, *Am. Mineral., 32,* págs. 502-507.

MERTIE, John B., Jr. (1942). Nomograms of optic angle formulae, *Am. Mineral., 27,* págs. 538-551.

PALACHE, CHARLES, BERMAN, HARRY, y FRONDEL, CLIFFORD (1951). *Dana's system of mineralogy* (7.ª ed.), vol. II, Nueva York: John Wiley and Sons, 1124 páginas.

RINNE, F. y BEREK, MAX (1953). *Anleitung zu optischen Untersuchungen mit dem Polarisationsmikroskop,* Stuttgart: E. Schweizerbart, 366 páginas.

ROSENFELD, JOHN L. (1950). Determination of... difficultly oriented minerals..., *Am. Mineral., 35,* págs. 902-905.

SAYLOR, CHARLES P. (1935). Accuracy of microscopical methods for determining refractive index by immersion. *J. Res. Nat. Bur. Stand., 15,* págs. 277-294.

SHAUB, B. M. (1959). Using the microscope for specific gravity determination of minute mineral grains, *Am. Mineral., 44,* págs. 890-891.

TOBI, A. C. (1956). A chart for measurement of optic axial angles, *Am. Mineral., 41,* págs. 516-519.

WEISS, C. S. (1817). Über ein verbesserte method für die Bezeichnung der verschiedenen Flächen eines Krystallisationssystems, *Abh. Akad. Wiss. Berlin, Physik. Kl.,* 1816-1817, págs. 231-285.

WILCOX, RAY E. (1959). Use of the spindle stage for determination of principal indices of refraction..., *Am. Mineral., 44,* págs. 1272-1293.

WINCHELL, A. N. (1931). *Microscopic characters of artificial minerals,* Nueva York: John Wiley and Sons, 403 páginas.

WINCHELL, A. N. y WINCHELL, HORACE (1951). *Elements of optical mineralogy,* Nueva York: John Wiley and Sons, 551 páginas.

WRIGHT, F. E. (1913). The index ellipsoid (optical indicatrix) in petrographic microscope works, *Am. Jour. Sci., 185,* págs. 133-138.

WRIGHT, F. E. (1923). Interference figures..., *Jour. Opt. Soc. Amer., 7,* págs. 779-817.

WRIGHT, W. D. (1958). *The measurement of color,* Nueva York: The Macmillan Company, 263 páginas.

WYLLIE, P. J. (1959). Discrepancies between optic axial angles of olivines measured over different bisectrices, *Am. Mineral., 44,* págs. 49-64.

# Índice alfabético


Absorción, 28 y sigs.
- coeficientes, 29
- color alocromático, 29
- color idiocromático, 29
- cristales biáxicos, 237
- cristales uniáxicos, 168
- efecto de la dispersión, 30 y sigs.
- ley de Lambert, 29
- turmalina, 168, 169

accesorios ópticos, 144
- adición, 145
- compensador de Berek, 165
- compensador de rendija, 165
- cuña de cuarzo, 145
- placa de yeso rojo de primer orden, 144, 145
- sustracción, 145

adición, 145
aire, índice de refracción, 18
ajuste del microscopio, 51 y sigs.
- alineación de los hilos del retículo, 53
- centrado del objetivo, 51
- fino, 51
- polarizadores, 51
- tosco, 51

alfa ($\alpha$), 172
- determinación, 224 y sigs.

alfa prima ($\alpha'$), 173
ampliación, 38
amplitud de onda, 17
- resolución por vectores, 85, 101

analizador, 41, 48
- transmisión, 117

anfíbol, ángulo de extinción, 231
ángulo axial óptico ($2V$), 177
- aparente, 181
- cálculo por la curvatura de las isogiras, 227
- determinación por el método de Mallard, 227
- determinación por el método de Tobi, 229
- fórmula de cálculo, 179
- monograma para determinarlo, 179
- variación con la longitud de onda, 208

ángulo de extinción, 166, 231
- determinación gráfica, 253

ángulo de incidencia, 20
ángulo de reflexión, 20
ángulo de reflexión total, 22
ángulo de refracción, 20
ángulo límite, 22
anisotropía, test, 75, 124
apertura angular, 44
apertura angular, efecto sobre una figura de interferencia, 196
apertura numérica, 44
- efecto sobre una figura de interferencia, 196

Bartholinus, E., 86
Bauer, N., 62
Berek, M., 126
Berman, H., 251
beta ($\beta$), 172
- determinación, 224

biaxialidad, determinación, 203, 219
birrefringencia, 88
- aparatos para medirla, 165
- estimación de los colores de interferencia, 163

bisectriz aguda, 175
- dispersión, 215, 216

bisectriz obtusa, 175
- dispersión, 213, 214

blanco de alto orden, 120
Bouma, P. J., 13
brookita, dispersión, 210

Cabellos cruzados, 49
calcita, 86
- birrefringencia, 88
- doble refracción, 88
- experimento, 89
- rayos *E* y *O*, 86

carbonatos romboédricos, determinación de $\epsilon$, 162
centrado del objetivo, 51
cloruro de sodio, índices, 27
coeficiente de dispersión, 27
color, 13
- límites de la longitud de ondas en el espectro, 13
- transmisión en los cristales biáxicos, 237
- transmisión en los cristales uniáxicos, 168
- transmisión en los medios isótropos, 28

colores de dispersión, 69
colores de interferencia, 118
- anormales, 171
- anormales para cristales biáxicos, 217
- anormales para cristales uniáxicos, 171
- efecto de la rotación, 122
- nomenclatura, 120
- órdenes, 120
- origen, 118

colores de interferencia, relación con el retardo, 120, fig. 8.17
simbolismo, 120
colores de Newton, 13
compensación, 144
adición, 145
reglas generales, 197
sustracción, 146
compensador, de Berek, 165
de mica, 145
de rendija, 165
compensadores, 144, 165
comportamiento de la luz, en el analizador, 85, 134
en el cristal, 101
composición y comportamiento de las ondas de luz, 101, 109, 114
conjunto de debajo de la platina, 43
conos de igual retardo, 128
conoscopio, 124
coordenadas de un punto, 241
cristales biáxicos, 172 y sigs.
absorción, 237
ángulo aparente de los ejes ópticos, 182
ángulo de los ejes ópticos, 174
bisectriz aguda, 175
bisectriz obtusa, 175
colores normales de interferencia, 217
determinación de la orientación óptica, 224
diagramas para la determinación de los cristales negativos, 293 y sigs.
diagramas para la determinación de los cristales positivos, 308 y sigs.
direcciones de vibración, 183
dispersión, 207
dispersión y orientación de *X, Y* y *Z,* 207 y sigs.
ejes ópticos, 174
examen óptico, 218 y sigs.
impreso para la recopilación de datos, 312
figuras de interferencia, *véase* figuras de interferencia biáxica
incidencia normal, 185
plano principal, 188
planos generales, 187
planos semigenerales, 188
sección circular, 189
incidencia oblicua, 191
indicatriz, 173
ecuación, 176
nomenclatura, 174, 185 y sigs.
secciones circulares, 174
índices principales, 172
medidas de índices, 224 y sigs.
negativos, 175
nomenclatura de los índices, 172
nomenclatura de los planos, 185
normal óptica, 174
planos generales, 186
planos principales, 185
cristales biáxicos, planos semigenerales, 186
pleocroísmo, 237
positivos, 175
refracción interna cónica, 189
signo óptico, 176
tablas de determinación, 281 y sigs.
cristales monoclínicos, cálculo de $\phi$ y de $\rho$, 251
determinación de las direcciones privilegiadas, 250
determinación de los ángulos de extinción, 253
dispersión, 213
orientación óptica, 213
cristales uniáxicos, 83
absorción, 169
colores anormales de interferencia, 171
comportamiento de las ondas de luz, 103
determinación de *v,* 156
diagramas para la determinación de los cristales negativos, 280
diagramas para la determinación de los cristales positivos, 279
dispersión de índices, 162
doble refracción, 89
eje óptico, 92
estudio óptico, 143
figuras de interferencia, 127 y sigs.
con el eje óptico centrado, 135
con el eje óptico no centrado, 136
determinación de signo óptico, 147
direcciones de vibración, 131 y sigs., 147
flash, 138
isocromas, 128 y sigs., 141
isogiras, 128, 131, 139 y sigs.
traza de un plano principal, 135
incidencia normal, 96
sección circular, 97
sección principal, 99
incidencia oblicua, 104 y sigs.
indicatriz, 91
ecuación, 90
terminología, 92
índices principales, 91
medida de los índices de refracción, 151
negativos, 91
nomenclatura de los índices, 90
normales de onda y trayectorias de los rayos, 93
plano principal, 92
pleocroísmo, 169
positivos, 91
retardo que producen, 111 y sigs.
sección al azar, 92
sección circular, 89
sección principal, 92
signo óptico, 91
tablas de determinación, 268 y sigs.
tipos de incidencia, 96

cuarzo, índices, 162
cuña de cuarzo, 144, 145
determinación del signo óptico, 222
curvas de dispersión, 69, 70
barita, 208
brookita, 210
efectos de proyectarlas sobre un papel de Hartmann, 69
metatorbenita, 162

Delta (Δ), 113
delta (δ), 202
densidad, uso de los aceites de inmersión para determinarla, 76
determinación, de la biaxialidad, 203, 219
de los focos de una elipse, 261
de los índices de refracción, *véase* índices de refracción
diafragma de iris, 44
diagramas para la determinación, de ε (diagrama de Loupekine), 161
de los colores de interferencia y de la birrefringencia, fig. 8-17
de los cristales biáxicos, 293 y sigs., 308 y sigs.
de los cristales uniáxicos, 279 y sigs.
de ν, 157, 160
de *V* con los melatopos en el campo (diafragma de Tobi), 230
de *V* con los melatopos fuera del campo (diagrama de Kart), 204
de 2*V* a partir de α, β y γ (diagrama de Mertie), 180
diferencia de trayectoria (Δ), 109, 113
cálculo, 113
efecto sobre los rayos que salen, 114 y sigs.
*véase también* retardo
diferenciación de las figuras de interferencia, 202
dirección lenta, 144
dirección rápida, 144
dirección normal de onda, 80
trayectorias de los rayos, 93, 182
dirección privilegiada, 17
para la incidencia normal, 97, 185
direcciones de vibración, en las figuras de interferencia biáxica, 196
en las figuras de interferencia uniáxica, 131, 147
para la incidencia normal, 97, 185
dispersión, 25
anómala, 32
bookita, 210
coeficiente, 27
colores, 69
cristales triclínicos, 216
cruzada, 215, 216
curvas, 69, 70
efectos en las figuras de interferencia, 208 y sigs.
ejes ópticos, 208
dispersión, ejes *X*, *Y* y *Z*, 213
fórmulas, 25, 26, 29, 30
horizontal, 213, 214
inclinada, 213
normal, 32
ortorrómbica normal, 208
paralela, 213, 214
plano axial cruzado, 210
y orientación óptica en los cristales ortorrómbicos, 232
distancia, de trabajo libre, 45
focal, 35
para una visión clara, 40
distancias conjugadas, 36
Ditchburn, R. W., 17
diyodometano, índice de refracción y densidad, 79
doble refracción, 89

2*E*, 182
determinación por el método de Mallard, 227
determinación por el método de Tobi, 228
ecuación, de Brewster, 21
de Cauchy, 25
de Chaulnes, 63
de la amplificación con microscopio, 39
de la apertura numérica, 45
de la corrección de la temperatura del aceite, 76
de la indicatriz biáxica, 176
de la transmisión por el analizador, 118
de Lambert, 29
de las relaciones
(α, β, γ, φ, ρ), 176
(α, β, γ, $V_z$), 179
(α, β, γ, 2*V*), 179
(Δ, *t*, *N*, *n*), 113
(ε, ε′, ω, ν), 156
(ε, ε′, ω, θ), 90
φ y ρ, cálculos tangenciales, 251
de Mallard, 227
de Sellmeier, 30
de Snell, 20, 87
del poder dispersivo, 28
efectos de la dispersión en las figuras de interferencia, 208 y sigs.
brookita, 210
comparación de los sistemas cristalinos, 216
cristales triclínicos, 216
cruzada, 215, 216
inclinada, 213
ortorrómbica normal, 208
paralela (horizontal), 213, 214
plano axial cruzado, 210
eje, de isotropía, 99
de una lente, 34
óptico, 92, 174

ejes cristalográficos, coordenadas cristalográficas standard, 248
ejes de una elipse, 261
ejes principales de vibración, 173
  relación con los ejes cristalográficos, 208, 211, 217
elipse, construcción, 262
  determinación de los focos, 261
  propiedades y nomenclatura, 261
  radio conjugado, 262
  semiejes, 92
elipsoide triaxial, 176
elongación positiva y negativa, 168, 235
Emmons, R. C., 61, 69, 229
épsilon ($\epsilon$), 89
  medida, 155
espectro, 25
  electromagnético, 13
  visible, 13, 14
espejo de debajo de la platina, 41
espesor aparente, 62
examen óptico, de cristales biáxicos, 218 y sigs.
  de cristales isótropos, 75 y sigs.
  de cristales uniáxicos, 143 y sigs.
extremos homodromo y anisodromo de la isogira, 138

Fairbairn, H. W., 229
figuras de interferencia, diferenciación, 202 y sigs.
figuras de interferencia biáxica, 192 y siguientes
  bisectriz aguda, 193
  bisectriz obtusa, 199
  con el eje óptico centrado, 198
  de la normal óptica, 200
  determinación del signo óptico, 220 y siguientes
  diferenciación, 202 y sigs.
  direcciones de vibración. 196
  dispersión, *véase* efectos de la dispersión
  distinción de las uniáxicas, 203
  explicación, 192
  generales, 200
  isocromas, 195
  isogiras, 196
  reconocimiento de la posición de extinción, 199
  relación con las observaciones ortoscópicas, 205
  semigenerales, 200
  significado de las isogiras rectas, 201
  traza de un plano principal, 197, 201
figuras de interferencia de la bisectriz aguda, 193
  efecto de $2E$ sobre el aspecto, 198
  efecto del espesor sobre el aspecto, 195
  empleo en la determinación del signo óptico, 220
  isocromas, 195
figuras de interferencia de la bisectriz aguda, isogiras, 196
figuras de interferencia de la bisectriz obtusa, 199
figura de interferencia uniáxica, *véase* cristales uniáxicos
Fisher, D. J., 62
fluorita, índices, 32
foco principal, 35
focos conjugados, 36
fórmula de Sellmeier, 30
Foster, W. R., 78
fragmentos de exfoliación de los granos isótropos, 77
frecuencia de las ondas, 17
frente de onda, 81
Frondel, C., 251
fuentes de luz, 15
fuentes puntuales de luz, 35

Gamma ($\gamma$), 172
  determinación, 224
gamma prima ($\gamma'$), 173
grano largo, lento, 168
  rápido, 168

Hardy, A. C., 13
Hartmann, papel de dispersión, 69

Identificación de minerales, *véase* diagramas de determinación
iluminación oblicua, 66
imagen, real, 38
  virtual, 38
inclusiones en cristales, 77
indicatriz, biáxica, 176 y sigs.
  isótropa, 82 y sigs.
  óptica, 81
  uniáxica, 85 y sigs.
índice de refracción, cambio con la temperatura, 74
  definición, 18
  del aire, 18
  determinación, corrección con la temperatura. 76
    cristales biáxicos, 218 y sigs.
    iluminación oblicua, 67
    líquidos, 61
    método de Becke, 64, 69
    método de Chaulnes, 62
    sensibilidad de los métodos de medida, 68
    sólidos isótropos, 75 y sigs.
    uso de las figuras de interferencia, 152 y sigs., 224
  precisión de su medida, usando el método de Becke, 69, 71, 76
    usando el método de la iluminación oblicua, 67, 69
  principal, cristales biáxicos, 172
    cristales uniáxicos, 90
  relación con la densidad y la composición, 18

índice de refracción, relación con la longitud de onda, 18
símbolos, para los cristales biáxicos, 172
para los cristales uniáxicos, 89, 151
para los medios isótropos, 27, 61
Ingerson, E., 172
interferencias, constructivas, 111
de las ondas luminosas, 110, 114 y sigs.
destructivas, 111
isocromas, 127
isogiras, biáxicas, 196
uniáxicas, 127, 131

Johannsen, A., 118

Kamb, W. B., 203, 223
Kerr, P. F., fig. 8-17

Lámpara, de tungsteno, 15
de vapor de sodio, 15
lente del campo, 48
lentes, condensadoras superiores, 43, 44
condensadoras inferiores, 43, 44
convergentes. 35
de Bertrand, 48
distancia focal, 35
ecuación, 36
eje, 34
foco principal, 35
formas básicas, 34
fuentes puntuales de luz, 35
limpieza, 53
ley de Brewster, 21
ley de Lambert, 29
ley de Snell, 20
limitaciones, 87
línea de colimación, 40
líneas de Becke, 64 y sigs.
coloreadas, 71
explicación, 66
significado de los colores y de las intensidades, 71
uso en la determinación del índice, 72
líneas de Fraunhofer, 27
longitud de onda, 17
de la luz, 13 y sigs.
de las líneas de Fraunhofer, 27
e índice de refracción, 18
y velocidad, 17
Lonhurst, R. S., 17
Loupekine, I. S., 162
luz, blanca, 15
coherente, 192
de día, distribución de la energía, 15
método de Chaulnes para medir el índice, 62
espectro, 13, 14
fuentes, 15
incoherente, 114
monocromática, 15
polarizada convergente, 124
polarizada plana, 16, 116
luz, plana, 41
policromática, 15
sodio, 15
tungsteno, 15
velocidad, 13
y color,

Medios de inmersión, 63, 71
relación entre el índice de inmersión y la densidad, 79
relieve, 64
medios isótropos, definición, 17
indicatriz, 82
pruebas, 83 y sigs.
melatopo, 138
metatorbenita, 162, 171
Mertie, J. B., Jr., 156, 179
método de Becke para la determinación del índice de refracción, 64
sensibilidad, 66
método de la iluminación central, 64
método de la iluminación oblicua, 66
sensibilidad, 66
método de Mallard, 227
método de Tobi, 228
método del doble diafragmado, sensibilidad, 68
método rectangular para construir una elipse, 262
mica, compensador, 145
lámina de un cuarto de onda, 145
determinación del signo óptico, 149
microscopio, accesorio, 144, 164
ajustes, 51 y sigs.
como conoscopio, 124
como ortoscopio, 124
compuesto, 38
de Bauch y Lomb, 55
de Cooke, 56
de Leitz, 57
de Reichert, 58
de Swift, 59
de Zeiss, 60
eje, 40
poder de amplificación, 39
polarizante, 41 y sigs.
milimicra (m$\mu$), 113
minerales anisótropos, diagramas para su determinación, 279-281, 293-295, 308-310.
$\alpha$-monocloronaftaleno, 72
densidad e índice de refracción de las mezclas, 79
movimiento de la onda, 16, 17
período. 114

Nicol, ajuste, 53
inferior, 41
superior, 41
nicoles, cruzados, 41
paralelos, 41
normal óptica (Y), 173, 174

nu ($\nu$), 136
medida, 155

Objetivos, 44
apertura angular, 45
apertura numérica, 45
centrado, 51
distancia de trabajo libre, 45
profundidad de enfoque, 45
observaciones, conoscópicas, 126, 206
ortoscópicas, 127, 206
ocular, 48
huygeniano, 49
lente de campo, 49
micrométrico, 50
negativo, 48
positivo, 48
omega ($\omega$), 89
medida, 152
onda, dirección normal, 80
lenta, 112
rápida, 112
movimiento, 16, 17
ondas de luz, 16
amplitud, 17
análisis vectorial, 85, 122
coherentes, 192
comportamiento, 109
composición, 109
ecuación, 17, 18
frecuencia, 17
incoherentes, 114
longitud, 17
ortoscopio, 124
orientación óptica standard, 255

Palache, C., 251
papel de dispersión de Hartmann, 69
período de onda, 114
peso específico, medición con aceites de inmersión, 77
phi ($\varphi$), 241
cálculo, 251
piroxeno, ángulos de extinción, 231
placa roja de primer orden, 144
uso en la determinación del signo óptico, 147, 221
plano de incidencia, 20
plano de vibración, 17
regla de Biot-Fresnel, 183
plano principal de los cristales biáxicos, 184, 188
incidencia normal, 185
símbolo, 185
plano principal de los cristales uniáxicos, 92
incidencia normal, 99
plano óptico, 174
plano semigeneral de los cristales biáxicos, 185, 188
incidencia normal, 187
incidencia oblicua, 191
plano semigeneral de los cristales uniáxicos, 92
incidencia normal, 99
plantilla de proyección estereográfica, 243
operaciones, 243
platina, de microscopio, 44
micrométrica, 50
pleocroísmo, de los cristales biáxicos, 237
de los cristales uniáxicos, 169
poder, de enfoque en profundidad, 46
dispersivo, 28
Podolsky, T., 229
polarización, circular, 116
elíptica, 116
plana, 16, 114
por reflexión, 20
por refracción, 21
polarizadores, 16, 41, 43
polo *P*, 238
posiciones de extinción, 124
prisma de Nicol, 41
proyecciones ciclográficas, 239 y sigs.
proyecciones directas, 238
proyecciones estereográficas, 239 y sigs.
cálculo de las coordenadas de una cara, 251
coordenadas, 241
ejemplo monoclínico, 250 y sigs.
cálculo de los índices de refracción, 255
determinación de las direcciones privilegiadas, 250
determinación de los ángulos de extinción, 253
proyección de puntos, 242, 244
rotación de puntos, 255
proyecciones polares, 239
proyecciones recíprocas, 239
proyecciones sobre una esfera, 238
psi ($\phi$), 157

*r*, 208
radios conjugados de una elipse, 262
rayo, 80
extraordinario (*E*), 86
ordinario (*O*), 86
y relaciones con las normales de onda en los cristales biáxicos, 182
y relaciones con las normales de onda en los cristales uniáxicos, 92
reflexión de la luz, 20
ley, 20
polarización, 21
reflexión total, 22
refracción de la luz, 20
polarización, 21
refractrómetro de Abbe, 61
regla de Biot-Fresnel, 183
aplicación bidimensional, 196
relación axial, cálculos tangenciales, tabla 11-1

relación de la intensidad con la amplitud, 102
relieve, 64
retardo, 113
cálculo, 113
efecto sobre la transmisión por el analizador, 117
medida de precisión, 165
*véanse también* diferencia de trayectoria
rho ($\rho$), 241
cálculo, 251
Rinne, F., 126
Rosenfeld, J. L., 218
rojo de primer orden, composición espectral, 120

Saylor, C. P., 66
sección principal, *véase* plano principal
secciones circulares biáxicas, 174
incidencia normal, 189
significado óptico, 83
símbolo, 187
secciones circulares uniáxicas, 91
incidencia normal, 96
Shaub, B. M., 79
signo de elongación, 168, 235
signo óptico biáxico, 175
determinación, 147, 220
signo óptico uniáxico, 91
superficies de Bertin, 195
superficies de igual retardo, cristales biáxicos, 195
cristales uniáxicos, 195
sustracción, 146

Tau ($\tau$), 101
tablas de determinación, minerales biáxicos, 281 y sigs., 296 y sigs.
tablas de determinación, minerales isótropos, 263 y sigs.
minerales uniáxicos, 268 y sigs.
tinta, de paso, 120
negativa, 120
Tobi, A. C., 155
turmalina, absorción, 168

*u* (apertura igual a la mitad de la apertura numérica), 45

*v*, 208
$2V_x$, $2V_z$, 177
velocidad, de la luz, 13
de las ondas electromagnéticas, 18
de las ondas luminosas, 13
violeta sensible, 120
vibración, plano, 16
Willcox, R. E., 76, 218
Winchell, A. N., 165, 251
Winchell, H., 165, 251
Wright, F. E., 67, 72
Wright, W. D., 15
Wyllie, P. J., 229

*X*, 173
*X'*, 187

*Y*, 173
*YC*, sección, 187
yeso, lámina, 144, 145
uso en la determinación del signo óptico, 221, 223

*Z*, 173
*Z'*, 185
zonas de los cristales, 231
efecto sobre la extinción, 232

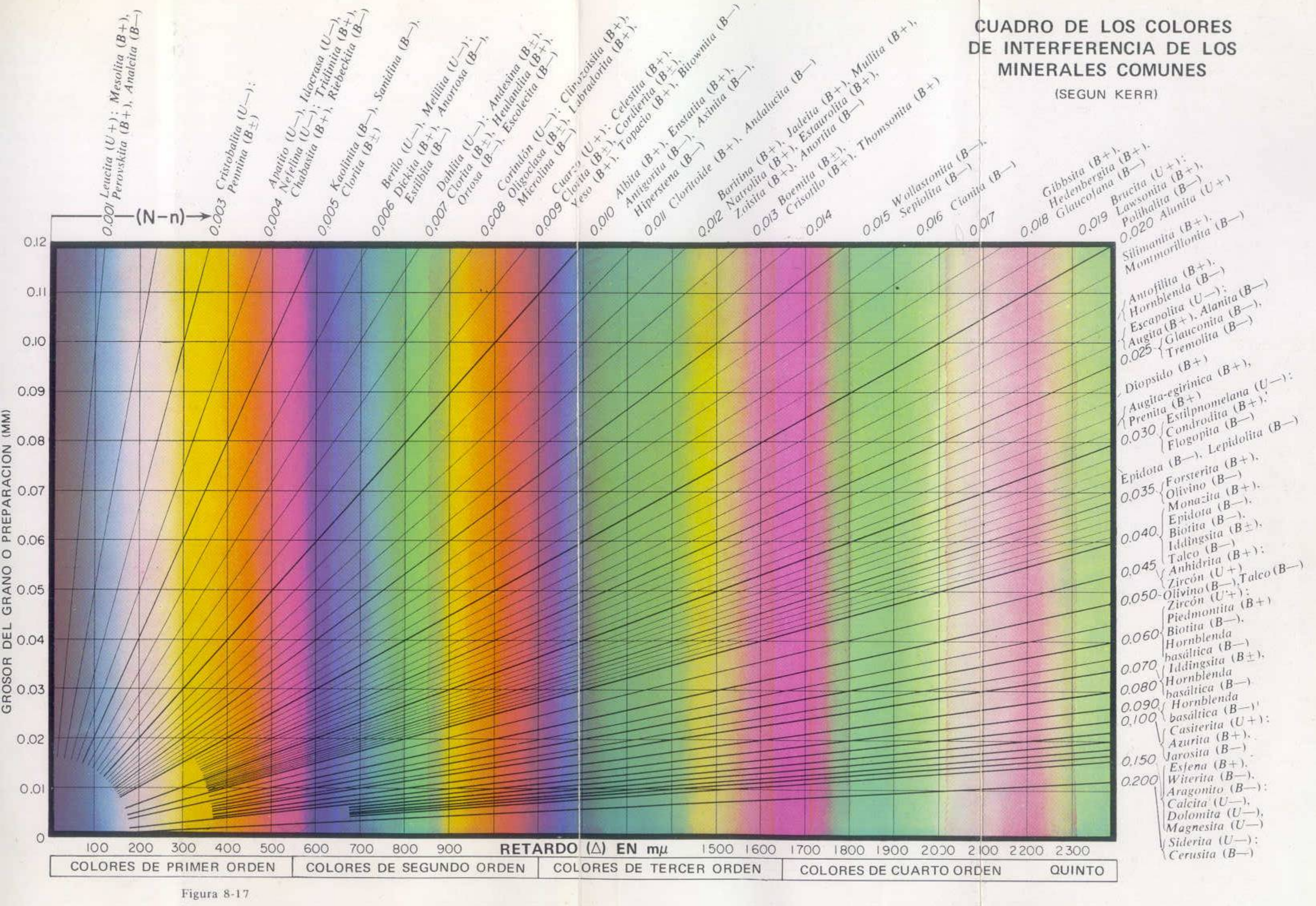



Figura 8-17

**El color de interferencia asociado a un valor determinado del retardo está expresado por una barra vertical, colocada encima de dicho valor. El espesor está expresado a lo largo de la ordenada. Las líneas radiales unen puntos de igual birrefringencia. Como ejemplo del uso del cuadro, nótese que el valor máximo de interferencia del cuarzo (birrefringencia 0,009) en una sección delgada (espesor 0,03 mm) está localizada en la intersección entre la línea radial 0,009 y la horizontal correspondiente a 0,03 mm. El color determinado es justamente amarillo de primer orden.**

# APENDICE I

# Propiedades de las elipses

Como puede verse en la figura 1-1, una elipse posee un eje mayor $AA'$ y perpendicular a él un eje menor, $BB'$; son respectivamente sus diámetros mayor y menor. A la mitad de estas distancias señaladas por $a$ y por $b$, se les denomina semiejes mayor y menor. Los dos focos, $F_1$ y $F_2$, están siempre

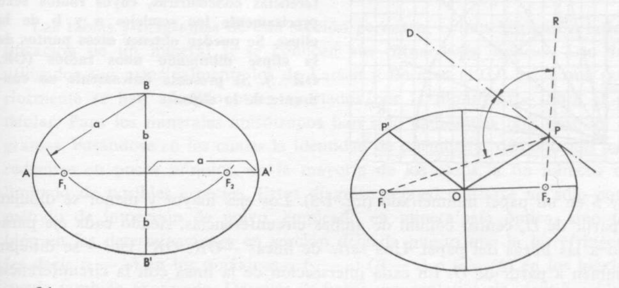



FIGURA I-1

**Determinación de los focos $F_1$ y $F_2$, en una elipse cuyos semiejes son a y b. Se ha trazado un arco de longitud a, tomando como centro B. Sus intersecciones con el eje mayor AA′ determinan $F_1$ y $F_2$.**

FIGURA I-2

**Construcción de OP′, el radio de la elipse conjugado de OP. Las líneas a trazos se han dibujado desde los focos $F_1$ y $F_2$ hasta P. La línea DP, que biseca el ángulo entre ellas, es paralela a OP′.**

sobre el eje mayor y pueden localizarse trazando un arco de radio $a$ (con centro en $B$, extremo del eje menor) hasta que corte al eje mayor. Las distancias focales, $OF_1$ o $OF_2$ en la figura 1-2, pueden también calcularse a partir de la fórmula pitagórica

$$OF_1 = OF_2 = \sqrt{a^2 - b^2}$$

Los radios que se pueden trazar a partir de *O*, centro de la elipse, se llaman simplemente radios; los que se trazan a partir de uno de los focos se llaman radios focales. Un radio *OP′* (fig. 1-2) se dice que es conjugado de un radio dado *OP*, si *OP′* es paralelo a la tangente a la elipse en *P*. La dirección de esta tangente (*DP* en la figura 1-2) puede determinarse: 1) trazando uno de los radios focales ($F_2P$) a través del punto *P* hasta un punto distante, por ejemplo *R* y entonces, 2) bisecando el ángulo $F_1PR$. Así *OP′*, el radio conjugado de *OP*, es la dirección que pasando por *O* es paralela a *DP*, la bisectriz del ángulo $F_1PR$.

La construcción de una elipse es algunas veces necesaria en la resolución gráfica de problemas de óptica. Un método conveniente para la construcción de una elipse cuyos ejes mayor y menor sean 2*a* y 2*b* respectivamente, es el rectangular, en el cual se trazan dos circunferencias concéntricas de radio

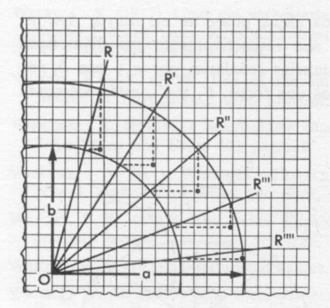



FIGURA I-3

**Método rectangular para construir una elipse, empezando por trazar unas circunferencias concéntricas, cuyos radios sean precisamente los semiejes a y b de la elipse. Se pueden obtener otros puntos de la elipse dibujando unos radios (OR, OR′...). Se presenta únicamente un cuadrante de la elipse.**

*a* y *b* en un papel milimetrado (fig. 1-3). Los ejes mayor y menor se dibujan a partir de *O*, centro común de ambas circunferencias, siendo cada eje paralelo a las líneas del papel. Una serie de líneas —*OR*, *OR′*, etc.— se dibujan también a partir de *O*. En cada intersección de la línea con la circunferencia mayor se dibujan unas líneas de trazos paralelos al eje menor; en sus intersecciones con la circunferencia menor, se trazan unas líneas semejantes a las anteriores y paralelas al eje mayor. Estas dos líneas de trazos se cortan en un punto de la elipse. En general, en los problemas de óptica, sólo se necesita construir una pequeña porción de la elipse.

# APENDICE II

# Tablas y diagramas de determinación óptica

Las tablas y diagramas de esta sección permiten, en muchos casos, la identificación de un mineral si se conocen sus propiedades ópticas. Los datos utilizados son principalmente los de Larsen y Berman (1934) a los que posteriormente se han añadido otros aportados por la bibliografía sobre el particular. Para los minerales anisótropos han sido elaboradas una serie de diagramas, basándose en los cuales la identidad de un mineral desconocido puede reducirse en pocos minutos, en la mayoría de los casos, a un número muy limitado de posibles especies. Estos diagramas pueden usarse no sólo con el método de inmersión de polvo, empleado en mineralogía óptica, sino también en las determinaciones en sección delgada puesto que la birrefringencia [es decir $(\varepsilon - \omega)$ en los uniáxicos y $(\gamma - \alpha)$ $(\beta - \alpha)$ o $(\gamma - \beta)$ en los biáxicos] queda también expresada. Después de hacer una tentativa de identificación de un mineral, se aconseja cotejar todas las características que se conocen acerca del ejemplar con las detalladas descripciones de las propiedades ópticas de la especie que se sospecha y que están recopiladas por Larsen y Berman (1934) o por Winchell y Winchell (1951).

## MINERALES ISÓTROPOS

La lista que se presenta en la tabla II-1 permite la determinación de un mineral isótropo desconocido a partir de un índice de refracción ($n$), y, si es necesario, su densidad ($G$). Este último valor puede determinarse, cuando es preciso, por medio de métodos de flotación (pág. 77) utilizando tanto el índice medio de refracción, como los líquidos pesados (fig. 5-14).

TABLA II-1

MINERALES ISÓTROPOS

(en orden creciente de índices de refracción, hasta $n = 1,999$)

| *n* | *G* | *Color* (1) | *Nombre del mineral* |
|---|---|---|---|
| 1,326 | 2,79 | R | Villaumita |
| 1,328 | 2,79 | R | Villaumita |
| 1,339 | 2,75 | Gris | Hieratita |
| 1,339 | 2,78 | Gris | Criolitionita |
| 1,370 | 2,0 | — | Criptohalita |
| 1,403 | 1,21? | Bl, Va | Termierita |
| 1,406 | 1,9 - 2,3 | Va | Ópalo |
| 1,427 | 2,61 | Inc, Bl, Am | Ralstonita |
| 1,434 | 1,86 | Inc | Ópalo |
| 1,434 | 3,36 - 3,63 | Vi, Az | Itrocerita |
| 1,434 | 3,18 | Inc, Pu, Va | Fluorita |
| 1,44± | 2,1 | Va | Ópalo |
| 1,44± | 2,5 | Cast, N | Hisingerita |
| 1,454 | 2,49 | Inc | Sulfohalita |
| 1,456 | 1,76 | Inc | Alumbre |
| 1,457 | 3,55 | Am | Itrofluorita |
| 1,459 | 1,64 | Bl | Tschermigita |
| 1,46 | 2,2 | Va | Ópalo |
| 1,461 | 2,04 | Inc | Melanoflogita |
| 1,462 | 2,19 | Inc | Lechatelierita |
| 1,47± | 2,6 | Cast, N | Neotocita |
| 1,47± | 1,8 | Az - Vr | Alofana |
| 1,479 | 2,26~ | Bl, Gris, Vr | Analcima |
| 1,48 | 1,92 | Bl | Faujasita |
| 1,48 | 2,3 | Bl, Inc, Gris | Noselita |
| 1,483 | 2,30 | Gris, Az | Sodalita |
| 1,485 | 1,94 | Inc | Evansita |
| 1,486 | 2,3 | Bl | Cristobalita |
| 1,487 | 2,25 | Bl, Gris, Vr | Analcima |
| 1,487 | 3,32 | R - Vi | Hackmanita |
| 1,49 | 1,86 | Az, Vr | Alofana |
| 1,490 | 1,99 | Inc | Silvina |
| 1,495 | 2,3 | Az | Noselita |
| 1,496 | 2,4 | Az | Haüyna |
| 1,496 | — | Vr, Bl | Bolivarita |

(1) Las abreviaturas dadas por Larsen y Berman (1934) para los colores, son las siguientes: Amb, Ambar; Bl, blanco; Az, Azul; Cast, Castaño; Gris, Gris; Inc, Incoloro; N, Negro; Nj, Naranja; Osc, Oscuro; Pu, Púrpura; R, Rojo; Rs, Rosa; Va, Variable; Vi, Violeta; Vr, Verde; Am, Amarillo. Símbolos unidos con un guión tales como Az-Vr se leerán así: azul verdoso. Aunque Larsen y Berman (1934) no lo indican, los colores dados en esta columna son los de reflexión, no los de la luz transmitida.

TABLA II-1 *(continuación)*

MINERALES ISÓTROPOS

| *n* | *G* | *Color* | *Nombre del mineral* |
|---|---|---|---|
| 1,50± | 2,4 | Az | Lazurita |
| 1,50± | — | — | Stevensita |
| 1,5± | 2,2 | Am | Rosieresita |
| 1,505 | 1,98 | Bl, Am, Vr | Vashegita |
| 1,508 | 2,46 - 2,59 | Inc | Tichita |
| 1,509 | 2,47 | Inc | Leucita |
| 1,51 | — | Bl, Va | Cimolita |
| 1,51 | 2,5 - 3 | Cast, N | Hisingerita |
| 1,51 | 2,5 | Az, Vr | Haüyna |
| 1,514 | 2,38 | Inc | Northupita |
| 1,517 | 2,65 | Vr | Planerita |
| 1,517 | <1,0 | Bl | Meerschaumita |
| 1,518 | — | Inc | Polucita |
| 1,525 | 2,9 | Inc | Polucita |
| 1,53± | 2,34 | Bl | Kehoeita |
| 1,533 | 2,83 | Inc | Langbeinita |
| 1,535 | 1,07 | Am - Amb | Succinita |
| 1,54± | 2,7 | Cast, N | Neotocita |
| 1,54± | — | Vr - Az | Cornuita |
| 1,541 | 1,05 | Am, Cast - R | Ajkaita |
| 1,542 | 1,09 | — | Telegdita |
| 1,542 | 2,6 | Bl | Halloysita |
| 1,544 | 2,17 | Inc | Halita |
| 1,555 | 2,6 | Bl | Halloysita |
| 1,558 | — | — | Serpentina (Ni) |
| 1,565 | — | Az | Traversoita |
| 1,569 | 2,6 | Bl | Colofanita |
| 1,57± | 2,6 | Vr | Zaratita |
| 1,57± | 2,5 - 3 | Cast - N | Hisingerita |
| 1,572 | 3,25 | Inc | Nitrobarita |
| 1,572 | 3,02 | R | Manganolangbeinita |
| 1,58± | 2,3 - 2,5 | Am | Koninckita |
| 1,584 | 1,95 - 2,05 | Bl | Schroetterita |
| 1,59± | 3 | N, N - Cast | Hesingerita |
| 1,59± | 2,6± | Vr | Zaratita |
| 1,59± | 2,7± | Bl | Colofanita |
| 1,59 | 2,6± | Vr | Garnierita |
| 1,590 | 2,93 | — | Kochita |
| 1,596 | 2,88 | Inc | Zunyita |
| 1,60± | 5± | Gris, Am, Inc | Stibiconita |

TABLA II-1 *(continuación)*

MINERALES ISÓTROPOS

| *n* | *G* | *Color* | *Nombre del mineral* |
|---|---|---|---|
| 1,60± | 2,7± | Cast - R | Borickita |
| 1,600 | 2,88 | Inc | Zunyita |
| 1,602 | 2,79 | Vr, Cast, N | Voltaita |
| 1,605 | 2,97 | Cast | Grodnolita |
| 1,61± | 2,6± | Vr | Zaratita |
| 1,61± | 2,03 | Cast, Am | Diadoquita |
| 1,61 | 2,96 | Cast, N | Alanita |
| 1,63± | 2,9± | Bl | Colofanita |
| 1,635 | 2,5 | Cast, Am, Bl | Pitticita |
| 1,638 | — | Cast - Rs | Hidrothorita |
| 1,639 | 1,53 | Inc | Sal amoníaco |
| 1,64 | 2,83 | Cast - Osc | Picita |
| 1,64± | 3,4 | Cast | Grifita |
| 1,640 | 3,35 | N | Homilita, metamict |
| 1,65± | 2 - 3 | Am | Koninckita |
| 1,65 | 2,66 | Cast, Am | Egueiita |
| 1,65± | 4,2 | Cast - Os | Tritomita |
| 1,65 | 2,8 | Vr, Am, Cast | Greenalita |
| 1,653 | 3,32 | Cast | Lovchorrita |
| 1,66 | 3,40 | Cast | Grifita |
| 1,66± | 3 | Cast, N | Hisingerita |
| 1,67± | 2,7± | Cast - R | Borickita |
| 1,67 | 3,05 | Inc | Hibschita |
| 1,674 | 3± | Vr, Am, Cast | Greenalita |
| 1,675 | 3,0 | Cast, Vr | Plazolita |
| 1,68± | 3,4 | Cast, N | Alanita |
| 1,69 | 3,40 | Inc | Rhodicita |
| 1,69 | 5,2 - 5,4 | Vr, Nj, N, Cast | Orangita |
| 1,70± | 5,0 | Gris | Stibioconita |
| 1,70 | 5,00 | Cast - Os, N | Policrasa |
| 1,702 | 4,12 | Vr | Arandisita |
| 1,705 | 3,510 | R | Piropo |
| 1,707 | 3,95 | Am, Am - Nj | Berzeliita |
| 1,710 | 4,414 | — | Uranothorita |
| 1,715 | 3,58 | N, Am, Cast, R, Az, Vr | Espinela |
| 1,716 | 1,99(?) | Cast | Delvauxita |
| 1,718 | 3,6± | R | Espinela |
| 1,720 | 3,683 | Vr - Os | Espinela |
| 1,72± | 3,5 - 4,2 | Cast, N | Alanita |
| 1,725 | 4,52 | R - Vr | Rowlandita |

TABLA II-1 *(continuación)*

MINERALES ISÓTROPOS

| *n* | *G* | *Color* | *Nombre del mineral* |
|---|---|---|---|
| 1,735 | 3,530 | Va | Grossularita |
| 1,736 | 3,6 | Inc | Periclasa |
| 1,739 | 3,2 | Am | Helvita |
| 1,74± | 4,6± | — | Pilbarita |
| 1,74± | 4,30 | Cast | Caryocerita |
| 1,742 | 3,715 | R | Piropo |
| 1,748 | 4,27 | Am, Am - Nj | Berzeliita |
| 1,75± | 3,75 | N, Vr | Espinela |
| 1,754 | 3,43 | R | Danalita |
| 1,755 | 3,70 | Bl | Arsenolita |
| 1,757 | 4,2 | Cast - Os | Tritomita |
| 1,758 | 4,58 | N, Cast, Vr | Yttrialita |
| 1,760 | 3,837 | R - Os | Rhodolita |
| 1,763 | 3,633 | Cast | Hessonita |
| 1,766 | — | R | Almandita |
| 1,77± | 4,13 | Cast, R | Melanocerita |
| 1,77 | 5,44 | N | Mackintoshita |
| 1,77± | 3,8± | N | Pleonasto |
| 1,779 | 4,45 | Am, Am - Nj | Berzeliita |
| 1,780 | 4,0 - 4,5 | N, N - Vr | Gadolinita |
| 1,782 | 4,38 | Vr - Gris | Gahnita |
| 1,789 | 3,917 | R - Os | Almandita |
| 1,790 | — | Az | Gahnita |
| 1,80± | 3,9 | N | Hercinita |
| 1,800 | 4,180 | Inc, R | Spessartita |
| 1,80± | 5± | Gris, Am | Stibioconita |
| 1,801 | 4,903 | R - Os | Almandita |
| 1,802 | — | N - Gris | Gahnita |
| 1,805 | 4,117 | R | Spessartita |
| 1,805 | 4,55 - 4,62 | Inc, Vr | Gahnita |
| 1,812 | 4,14 | Cast, Am | Beckelita |
| 1,815 | 4,211 | R | Spessartita |
| 1,818 | — | R | Almandita |
| 1,818 | 4,09 | Vr - Os, Cast | Naegita |
| 1,82 | 4,12 | Vr | Arandisita |
| 1,826 | 4,0 - 4,3 | Inc | Malacon |
| 1,83 | 5,04 | Am | Romeita |
| 1,83 | 4,39 | N | Hercinita |
| 1,830 | 4,250 | R - Os | Almandita |
| 1,838 | 3,32 | Inc | Lima |

TABLA II-1 *(continuación)*

MINERALES ISÓTROPOS

| *n* | *G* | *Color* | *Nombre del mineral* |
|---|---|---|---|
| 1,838 | 3,418 | Vr | Uvarovita |
| 1,84 | 3,75 | Vr | Uvarovita |
| 1,86± | 4,8± | Gris, Vr | Bindheimita |
| 1,86 | 3,78 | Vr | Uvarovita |
| 1,865 | 3,781 | Va | Andradita |
| 1,87± | 5,07 | Am | Romeita |
| 1,87± | 3,77 | Cast - Gris | Calcolamprita |
| 1,88 | 4,3 - 4,55 | N | Tscheffkinita |
| 1,88 | 3,76 | N, R, Cast | Andradita |
| 1,89± | 3,6 - 3,9 | Cast - Osc, N | Ellsworthita |
| 1,895 | 3,750 | Am, Vr, Cast, N | Andradita |
| 1,90± | 5 | Gris, Am | Estibiconita |
| 1,92± | 4 | N - Vr | Betafita |
| 1,923 | 4,23 | N | Galaxita |
| 1,925 | 5,51 | Am, Cast, R | Microlita |
| 1,93 | 3;93 | Inc | Nantokita |
| 1,935 | 5,5 - 5,7 | Vr | Microlita |
| 1,94 | 3,7 | N | Melanita |
| 1,94 | 5,24 | Am | Samiresita |
| 1,96± | 5,19 | Am | Neotantalita |
| 1,96 | 4,3± | Cast | Pirocloro |
| 1,965 | 4,3 - 4.55 | N | Tscheffkinita |
| 1,97 | 5,8 | Cast | Djalmaita |
| 1,98± | 4,8± | Cast | Hatchettolita |
| 1,98 | 3,85 | N | Schorlomita |
| 1,99± | 5 | Am, Gris | Estibioconita |
| 1,99± | 5,95 | Cast - Am | Microlita |

## MINERALES UNIÁXICOS

Se han reunido en la tabla II-2 datos ópticos de 342 especies minerales uniáxicas. En la primera parte de la tabla se reúnen los minerales positivos; en la segunda, los negativos. A cada mineral uniáxico se le asigna un número de código (columna izquierda). En las figuras II-1 y II-2, que están a continuación de la tabla, se proyectan referidos a $\omega$ y al valor absoluto de la birrefringencia ($\epsilon - \omega$). En consecuencia, si $\epsilon$ y $\omega$ se han medido en un mineral desconocido, el punto con coordenadas $\omega$ y ($\epsilon - \omega$) puede situarse en las figuras II-1 o II-2, según que el cristal sea positivo o negativo. Puede

colocarse sobre este punto un cuadrado de lado igual a 0,004 —es decir, aproximadamente el doble del error que se comete en las medidas de los índices de refracción—. Los números de código que queden dentro de este cuadrado indicarán, en la tabla II-2, los minerales que pueden identificarse con el desconocido. Si hay varias posibilidades, debe consultarse un texto de referencia (Winchell y Winchell, 1951) para descripciones más detalladas (exfoliación y otras), con lo cual, el mineral problema puede compararse con más aproximación, y por último, ser identificado. Si el mineral uniáxico desconocido no es uno de los minerales uniáxicos relacionados en la tabla II-2, es obvio que estos diagramas no pueden usarse para su identificación.

Las figuras II-1 y II-2 pueden emplearse en estudios de sección delgada siempre que el signo óptico y la birrefringencia, $(\epsilon - \omega)$ o $(\omega - \epsilon)$, sean determinables. De este modo, si se conocen birrefringencia y signo óptico, se define un área vertical, en forma de barra en una de las figuras; esta área puede contener, entre otros, el número de código que identificará el mineral desconocido. Habrá, en general, una serie de posibilidades. El cálculo visual de $\omega$, mediante la observación del relieve del mineral con relación al bálsamo de Canadá —o bien a un mineral adyacente, de índice de refracción conocido—, puede reducir esta multiplicidad.

## TABLA II-2

### MINERALES UNIÁXICOS

| *N.º de código* | $\omega$ | $\epsilon$ | *Nombre del mineral* |
|---|---|---|---|
| | | | ÓPTICAMENTE POSITIVOS |
| *1* | 1,46 | 1,54 | Crisocola |
| *2* | 1,46± | 1,57 | Crisocola |
| *3* | 1,461 | 1,474 | Tincalconita |
| *4* | 1,47 | 1,50 | Hatchettita |
| *5* | 1,470 | 1,474 | Gmelinita |
| *6* | 1,475 | 1,486 | Laubanita |
| *7* | 1,480 | 1,482 | Chabasita |
| *8* | 1,487 | 1,492 | Aftitalita |
| *9* | 1,488 | 1,500 | Douglasita |
| *10* | 1,490 | 1,502 | Natrolita hidronefelita |
| *11* | 1,490 | 1,496 | Aftitalita |
| *12* | 1,500 | 1,510 | Liskeardita |
| *13* | 1,508 | 1,509 | Leucita |
| *14* | 1,515 | 1,54 | Ozocerita |
| *15* | 1,518 | 1,522 | Leifita |
| *16* | 1,518 | 1,521 | Davyna |
| *17* | 1,52 | 1,55 | Koenenita |
| *18* | 1,521 | 1,529 | Microsommita |
| *19* | 1,522 | 1,527 | Natrodavyna |
| *20* | 1,533 | 1,575 | Fibroferrita |

TABLA II-2 *(continuación)*

MINERALES UNIÁXICOS

| *N.º de código* | ω | ε | *Nombre del mineral* |
|---|---|---|---|
| | | | ÓPTICAMENTE POSITIVOS |
| *21* | 1,535 | 1,537 | Apofilita |
| *22* | 1,536 | 1,572 | Coquimbita |
| *23* | 1,536 | 1,572 | Ashcroftina |
| *24* | 1,544 | 1,553 | Cuarzo |
| *25* | 1,550 | 1,650 | Vaterita |
| *26* | 1,550 | 1,556 | Coquimbita |
| *27* | 1,556 | 1,645 | Julienita |
| *28* | 1,559 | 1,627 | Ferrinatrita |
| *29* | 1,559 | 1,580 | Brucita |
| *30* | 1,562 | 1,576 | Clorita, blanca |
| *31* | 1,565 | 1,575 | Pinnoita |
| *32* | 1,566 | 1,585 | Brucita |
| *33* | 1,572 | 1,592 | Alunita |
| *34* | 1,576 | 1,579 | Penninita |
| *35* | 1,576 | 1,584 | Ekmannita |
| *36* | 1,580 | 1,588 | Ceruleolactita |
| *37* | 1,582 | 1,645 | Cacoxenita |
| *38* | 1,583 | 1,602 | Alumina |
| *39* | 1,589 | 1,590 | Rinneita |
| *40* | 1,590 | 1,600 | Wardita |
| *41* | 1,59 | 1,60 | Manganobrucita |
| *42* | 1,597 | 1,612 | Amesita |
| *43* | 1,604 | 1,615 | Sarcolita |
| *44* | 1,606 | 1,611 | Eudialita |
| *45* | 1,609 | 1,630 | Narsarsukita |
| *46* | 1,614 | 1,648 | Pseudowollastonita |
| *47* | 1,619 | 1,627 | Pseudowavelita |
| *48* | 1,620 | 1,654 | Churchita |
| *49* | 1,620 | 1,630 | Hamlinita (Goyasita) |
| *50* | 1,622 | 1,631 | Pseudowavelita |
| *51* | 1,623 | 1,625 | Metatorbernita |
| *52* | 1,626 | 1,640 | Svanbergita |
| *53* | 1,629 | 1,639 | Hamlinita (Goyasita) |
| *54* | 1,630 | 1,640 | Deltaita |
| *55* | 1,630 | 1,640 | Pseudowavelita |
| *56* | 1,632 | 1,639 | Akermanita |
| *57* | 1,633 | 1,639 | Akermanita |
| *58* | 1,634 | 1,640 | Hamlinita (Goyasita) |
| *59* | 1,644 | 1,697 | Dioptasa |
| *60* | 1,654 | 1,670 | Fenacita |

TABLA II-2 *(continuación)*

MINERALES UNIÁXICOS

| *N.º de código* | ω | ε | *Nombre del mineral* |
|---|---|---|---|
| | | | ÓPTICAMENTE POSITIVOS |
| *61* | 1,654 | 1,676 | Plumbogummita |
| *62* | 1,654 | 1,703 | Rhabdofana |
| *63* | 1,655 | 1,708 | Dioptasa |
| *64* | 1,662 | 1,663 | Cahnita |
| *65* | 1,665 | 1,685 | Auerlita, alterada |
| *66* | 1,671 | 1,689 | Hinsdalita |
| *67* | 1,676 | 1,757 | Parisita |
| *68* | 1,680 | 1,685 | Florencita |
| *69* | 1,691 | 1,719 | Willemita |
| *70* | 1,697 | 1,719 | Willemita |
| *71* | 1,701 | 1,726 | Willemita |
| *72* | 1,714 | 1,732 | Troostita |
| *73* | 1,716 | 1,721 | Idocrasa |
| *74* | 1,717 | 1,818 | Bastnaesita |
| *75* | 1,719 | 1,733 | Bromelita |
| *76* | 1,720 | 1,827 | Xenotima |
| *77* | 1,721 | 1,816 | Xenotima |
| *78* | 1,724 | 1,746 | Connellita |
| *79* | 1,730 | 1,810 | Mixita |
| *80* | 1,75 ± | 1,765 | Buttgenbachita |
| *81* | 1,750 | 1,752 | Abukumalita |
| *82* | 1,757 | 1,804 | Benitoita |
| *83* | 1,778 | 1,801 | Conicalcita |
| *84* | 1,794 | 1,803 | Arseniopleıta |
| *85* | 1,80 | 1,81 | Torita |
| *86* | 1,90 | 2,12 | Trippkeita |
| *87* | 1,910 | 1,945 | Ganomalita |
| *88* | 1,913 | 1,923 | Nasonita |
| *89* | 1,918 | 1,934 | Scheelita |
| *90* | 1,920 | 1,937 | Scheelita |
| *91* | 1,926 | 1,985 | Zircon |
| *92* | 1,936 | 1,991 | Zircon |
| *93* | 1,945 | 1,971 | Nasonita |
| *94* | 1,948 | 1,958 | Hedifana |
| *95* | 1,96 | 2,02 | Zircon |
| *96* | 1,973 | 2,656 | Calomelanos |
| *97* | 1,974 | 1,984 | Powellita |
| *98* | 1,997 | 2,093 | Casiterita |
| *99* | 2,001 | 2,097 | Casiterita |
| *100* | 2,013 | 2,029 | Zincita |

TABLA II-2 *(continuación)*

MINERALES UNIÁXICOS

| *N.º de código* | ω | ε | *Nombre del mineral* |
|---|---|---|---|
| | | | ÓPTICAMENTE POSITIVOS |
| *101* | 2,114 | 2,140 | Fosgenita |
| *102* | 2,13 | 2,21 | Penfieldita |
| *103* | 2,19 | 2,21 | Kleinita |
| *104* | 2,21 | 2,22 | Iodirita |
| | | | ÓPTICAMENTE NEGATIVOS |
| *105* | 1,465 | 1,464 | Gmelinita |
| *106* | 1,480 | 1,478 | Chabasita |
| *107* | 1,481 | 1,461 | Hanksita |
| *108* | 1,487 | 1,484 | Cristobalita |
| *109* | 1,487 | 1,486 | Analcita |
| *110* | 1,488 | 1,474 | Ettringita |
| *111* | 1,490 | 1,471 | Loewita |
| *112* | 1,496 | 1,491 | Gmelinita |
| *113* | 1,496 | 1,491 | Levynita |
| *114* | 1,500 | 1,464 | Thaumasita |
| *115* | 1,507 | 1,468 | Thaumasita |
| *116* | 1,507 | 1,500 | Cancrinita |
| *117* | 1,509 | 1,486 | Nocerita |
| *118* | 1,512 | 1,487 | Nocerita |
| *119* | 1,512 | 1,498 | Hidrotalcita |
| *120* | 1,516 | 1,470 | Beidellita |
| *121* | 1,520 | 1,512 | Taquhidrita |
| *122* | 1,524 | 1,496 | Cancrinita |
| *123* | 1,530 | 1,506 | Slaviquita |
| *124* | 1,532 | 1,528 | Nefelina |
| *125* | 1,532 | 1,527 | Kaliofilita |
| *126* | 1,532 | 1,529 | Milarita |
| *127* | 1,533 | 1,530 | Calcedonia |
| *128* | 1,534 | 1,514 | Aluminato de cinc |
| *129* | 1,534 | 1,522 | Dipiro (4,2 % $K_2O$) |
| *130* | 1,537 | 1,535 | Apofilita |
| *131* | 1,537 | 1,533 | Nephelina |
| *132* | 1,539 | 1,511 | Melita |
| *133* | 1,539 | 1,530 | Calcedonia |
| *134* | 1,539 | 1,535 | Nefelita |

TABLA II-2 *(continuación)*

MINERALES UNIÁXICOS

| *N.º de código* | ω | ε | *Nombre del mineral* |
|---|---|---|---|
| | | | ÓPTICAMENTE NEGATIVOS |
| *135* | 1,540 | 1,536 | Marialita |
| *136* | 1,540 | 1,510 | Brugnatellita |
| *137* | 1,542 | 1,538 | Nefelita |
| *138* | 1,542 | 1,516 | Stichtita |
| *139* | 1,545 | 1,503 | Folidolita |
| *140* | 1,547 | 1,522 | Fluoborita |
| *141* | 1,549 | 1,536 | Girolita |
| *142* | 1,550 | 1,542 | Dipiro |
| *143* | 1,550 | 1,540 | Dipiro |
| *144* | 1,552 | 1,543 | Dipiro |
| *145* | 1,554 | 1,541 | Dipiro |
| *146* | 1,558 | 1,545 | Dipiro |
| *147* | 1,560 | 1,540 | Jeffersita |
| *148* | 1,560 | 1,495 | Trudellita |
| *149* | 1,565 | 1,560 | Zeofillita |
| *150* | 1,565 | 1,545 | Dipiro |
| *151* | 1,566 | 1,528 | Fluoborita |
| *152* | 1,567 | 1,545 | Wernerita |
| *153* | 1,568 | 1,564 | Berilo |
| *154* | 1,569 | 1,550 | Dipiro |
| *155* | 1,570 | 1,545 | Mizzonita |
| *156* | 1,575 | 1,552 | Mizzonita |
| *157* | 1,575 | 1,550 | Mizzonita |
| *158* | 1,575 | 1,57 | Calcioferrita |
| *159* | 1,576 | 1,546 | Parsettensita |
| *160* | 1,579 | 1,577 | Penninita |
| *161* | 1,580 | 1,553 | Mizzonita |
| *162* | 1,581 | 1,551 | Mizzonita |
| *163* | 1,581 | 1,575 | Berilo |
| *164* | 1,582 | 1,555 | Mizzonita |
| *165* | 1,582 | 1,545 | Mizzonita |
| *166* | 1,583 | 1,549 | Mizzonita |
| *167* | 1,584 | 1,554 | Mizzonita |
| *168* | 1,585 | 1,551 | Mizzonita |
| *169* | 1,586 | 1,560 | Uranospinita |
| *170* | 1,587 | 1,336 | Nitrato sódico |
| *171* | 1,587 | 1,559 | Mizzonita |
| *172* | 1,588 | 1,553 | Mizzonita |
| *173* | 1,590 | 1,560 | Mizzonita |
| *174* | 1,59± | 1,56 | Connarita |

TABLA II-2 *(continuación)*

MINERALES UNIÁXICOS

| *N.º de código* | ω | ε | *Nombre del mineral* |
|---|---|---|---|
| | | | ÓPTICAMENTE NEGATIVOS |
| *175* | 1,591 | 1,573 | Metavoltina |
| *176* | 1,592 | 1,582 | Torbernita |
| *177* | 1,594 | 1,556 | Mizzonita |
| *178* | 1,595 | 1,557 | Mizzonita |
| *179* | 1,598 | 1,590 | Berilo |
| *180* | 1,600 | 1,563 | Meionita |
| *181* | 1,60± | 1,55± | Cloraluminita |
| *182* | 1,600 | 1,585 | Dehrnita |
| *183* | 1,601 | 1,591 | Dennisonita |
| *184* | 1,603 | 1,598 | Dahllita |
| *185* | 1,607 | 1,571 | Meionita |
| *186* | 1,612 | 1,593 | Melifanita |
| *187* | 1,613 | 1,607 | Fluocerita |
| *188* | 1,618 | 1,552 | Chalcophillita |
| *189* | 1,620 | 1,609 | Dahllita |
| *190* | 1,621 | 1,619 | Gillespita |
| *191* | 1,621 | 1,618 | Eucolita |
| *192* | 1,621 | 1,611 | Lewistonita |
| *193* | 1,623 | 1,613 | Dehrnita |
| *194* | 1,623 | 1,620 | Merrillita |
| *195* | 1,624 | 1,613 | Lewistonita |
| *196* | 1,626 | 1,605 | Bazzita |
| *197* | 1,627 | 1,582 | Troegerita |
| *198* | 1,629 | 1,624 | Francolita |
| *199* | 1,630 | 1,622 | Podolita |
| *200* | 1,632 | 1,626 | Melilita |
| *201* | 1,632 | 1,602 | Bementita |
| *202* | 1,632 | 1,575 | Calcofilita, alterada |
| *203* | 1,633 | 1,629 | Melilita |
| *204* | 1,633 | 1,629 | Voelckerita |
| *205* | 1,633 | 1,630 | Fluorapatito, puro |
| *206* | 1,634 | 1,629 | Fluorapatito |
| *207* | 1,635 | 1,631 | Dahllita |
| *208* | 1,636 | 1,613 | Dravita |
| *209* | 1,637 | 1,615 | Mitscherlichita |
| *210* | 1,639 | 1,637 | Stroncianapatito |
| *211* | 1,640 | 1,636 | Wilkeita |
| *212* | 1,640 | 1,633 | Dehrnita |
| *213* | 1,641 | 1,621 | Turmalina cálcica, uvita |
| *214* | 1,642 | 1,623 | Rubelita |

TABLA II-2 *(continuación)*

MINERALES UNIÁXICOS

| *N.º de código* | ω | ε | *Nombre del mineral* |
|---|---|---|---|
| | | | ÓPTICAMENTE NEGATIVOS |
| *215* | 1,643 | 1,623 | Zeunerita |
| *216* | 1,646 | 1,641 | Manganofluorapatita |
| *217* | 1,646 | 1,625 | Indicolita |
| *218* | 1,647 | 1,636 | Gehlenita |
| *219* | 1,648 | 1,625 | Rubelita |
| *220* | 1,649 | 1,644 | Apatito |
| *221* | 1,649 | 1,643 | Daphnita |
| *222* | 1,650 | 1,646 | Wilkeita |
| *223* | 1,650 | 1,624 | Bementita |
| *224* | 1,650 | 1,575 | Szaibelita |
| *225* | 1,651 | 1,644 | Hidroxilapatito |
| *226* | 1,653 | 1,623 | Friedelita |
| *227* | 1,655 | 1,650 | Wilkeita |
| *228* | 1,655 | 1,651 | Manganapatito |
| *229* | 1,655 | 1,650 | Ellestadita |
| *230* | 1,655 | 1,645 | Koninckita |
| *231* | 1,655 | 1,633 | Turmalina |
| *232* | 1,657 | 1,653 | Gehlenita |
| *233* | 1,658 | 1,486 | Calcita, pura |
| *234* | 1,661 | 1,657 | Manganohidroxilapatito |
| *235* | 1,662 | 1,633 | Turmalina |
| *236* | 1,662 | 1,636 | Turmalina |
| *237* | 1,664 | 1,629 | Friedelita |
| *238* | 1,666 | 1,658 | Gehlenita |
| *239* | 1,667 | 1,664 | Clorapatito |
| *240* | 1,667 | 1,490 | Plumbocalcita |
| *241* | 1,669 | 1,658 | Gehlenita |
| *242* | 1,670 | 1,658 | Gehlenita |
| *243* | 1,671 | 1,639 | Schorlita |
| *244* | 1,672 | 1,662 | Hardystonita |
| *245* | 1,672 | 1,644 | Turmalina |
| *246* | 1,675 | 1,636 | Prosmalita |
| *247* | 1,675 | 1,59 | Cloromagnesita |
| *248* | 1,679 | 1,502 | Magnesiodolomita |
| *249* | 1,680 | 1,655 | Sincosita |
| *250* | 1,681 | 1,647 | Schorlita |
| *251* | 1,681 | 1,643 | Schallerita |
| *252* | 1,681 | 1,500 | Dolomita, pura |
| *253* | 1,682 | 1,662 | Turmalina |
| *254* | 1,684 | 1,672 | Svabita |

TABLA II-2 *(continuación)*

MINERALES UNIÁXICOS

| *N.º de código* | ω | ε | *Nombre del mineral* |
|---|---|---|---|
| | | | ÓPTICAMENTE NEGATIVOS |
| *255* | 1,686 | 1,505 | Magnesiodolomita |
| *256* | 1,687 | 1,641 | Turmalina crómica |
| *257* | 1,690 | 1,673 | Ferroakermanita |
| *258* | 1,69 | 1,60 | Stilpnomelana |
| *259* | 1,691 | 1,691 | Gehlenita |
| *260* | 1,694 | 1,641 | Spangolita |
| *261* | 1,698 | 1,658 | Schorlita |
| *262* | 1,698 | 1,518 | Ankerita |
| *263* | 1,700 | 1,509 | Magnesita |
| *264* | 1,704 | 1,697 | Schallerita |
| *265* | 1,705 | 1,701 | Idocrasa (Vesubiana) |
| *266* | 1,706 | 1,698 | Svabita |
| *267* | 1,707 | 1,698 | Genevita |
| *268* | 1,712 | 1,700 | Idocrasa, con Be |
| *269* | 1,713 | 1,705 | Idocrasa, ciprina |
| *270* | 1,716 | 1,526 | Ankerita |
| *271* | 1,718 | 1,700 | Ferroschallerita |
| *272* | 1,719 | 1,715 | Idocrasa |
| *273* | 1,721 | 1,534 | Calcita, con Mn |
| *274* | 1,723 | 1,681 | Pirocrorita |
| *275* | 1,726 | 1,527 | Magnesita |
| *276* | 1,728 | 1,531 | Ankerita |
| *277* | 1,73± | 1,72 | Melanocerita |
| *278* | 1,733 | 1,714 | Hematolita |
| *279* | 1,736 | 1,732 | Idocrasa |
| *280* | 1,743 | 1,546 | Manganodolomita |
| *281* | 1,748 | 1,645 | Freirinita |
| *282* | 1,749 | 1,547 | Ankerita |
| *283* | 1,76 | 1,63 | Stilpnomelana |
| *284* | 1,760 | 1,557 | Cordylita |
| *285* | 1,765 | 1,555 | Ferrodolomita |
| *286* | 1,768 | 1,760 | Corindón |
| *287* | 1,772 | 1,763 | Corindón, rojo osc. rubí |
| *288* | 1,772 | 1,770 | Swedenborgita |
| *289* | 1,777 | 1,772 | Britholita |
| *290* | 1,788 | 1,570 | Mesitita |
| *291* | 1,800 | 1,750 | Ammoniojarosita |
| *292* | 1,80 | 1,72 | Ferritungstita |
| *293* | 1,815 | 1,761 | Molibdofilita |
| *294* | 1,816 | 1,728 | Borgstroemita |

TABLA II-2 *(continuación)*

MINERALES UNIÁXICOS

| *N.º de código* | ω | ε | *Nombre del mineral* |
|---|---|---|---|
| | | | ÓPTICAMENTE NEGATIVOS |
| *295* | 1,816 | 1,597 | Rodocrosita |
| *296* | 1,816 | 1,600 | Rodocrosita |
| *297* | 1,817 | 1,597 | Rodocrosita |
| *298* | 1,820 | 1,715 | Jarosita |
| *299* | 1,82 | 1,73 | Carfosiderita |
| *300* | 1,826 | 1,605 | Rodocrosita |
| *301* | 1,830 | 1,745 | Ammoniojarosita |
| *302* | 1,830 | 1,750 | Natrojarosita |
| *303* | 1,830 | 1,596 | Siderita |
| *304* | 1,849 | 1,621 | Smithsonita |
| *305* | 1,849 | 1,615 | Manganosiderita |
| *306* | 1,850 | 1,625 | Smithsonita |
| *307* | 1,853 | 1,803 | Hoegbomita |
| *308* | 1,855 | 1,613 | Siderita |
| *309* | 1,855 | 1,600 | Esferocobaltita |
| *310* | 1,870 | 1,792 | Arseniosiderita |
| *311* | 1,87 | 1,85 | Dussertita |
| *312* | 1,872 | 1,634 | Siderita |
| *313* | 1,875 | 1,633 | Siderita |
| *314* | 1,875 | 1,784 | Plumbojarosita |
| *315* | 1,882 | 1,785 | Argentojarosita |
| *316* | 1,898 | 1,815 | Arseniosiderita |
| *317* | 1,905 | 1,785 | Argentojarosita |
| *318* | 2,01 | 1,99 | Armangita |
| *319* | 2,01 | 1,82 | Bismita |
| *320* | 2,026 | 2,010 | Hedyfana |
| *321* | 2,03 | 2,00 | Pseudoboleita |
| *322* | 2,041 | 1,926 | Cumengeita |
| *323* | 2,050 | 2,042 | Piromorfita |
| *324* | 2,05 | 2,03 | Boleita |
| *325* | 2,07 | 2,05 | Barisilita |
| *326* | 2,09 | 1,94 | Hidrocerusita |
| *327* | 2,13 | 1,94 | Bismutosferita |
| *328* | 2,135 | 2,118 | Mimetita |
| *329* | 2,15 | 2,04 | Matlockita |
| *330* | 2,16 | 2,14 | Bellita |
| *331* | 2,25 | 2,20 | Endlichita |
| *332* | 2,26 ± | 2,10 | Hetaerolita |
| *333* | 2,269 | 2,182 | Stolzita |
| *334* | 2,295 | 2,285 | Finnemanita |

TABLA II-2 *(continuación)*

MINERALES UNIÁXICOS

| *N.º de código* | ω | ε | *Nombre del mineral* |
|---|---|---|---|
| | | | ÓPTICAMENTE NEGATIVOS |
| *335* | 2,31 | 1,95 | Geikielita |
| *336* | 2,32Li | 2,25Li | Ecdenita |
| *337* | 2,34± | 2,14 | Hetaerolita |
| *338* | 2,35Li | 2,33Li | Loretoita |
| *339* | 2,354 | 2,299 | Vanadinita |
| *340* | 2,36Li | 2,25Li | Schwartzembergita |
| *341* | 2,36Li | 2,31Li | Langbanita |
| *342* | 2,40 | 2,28 | Wulfenita |

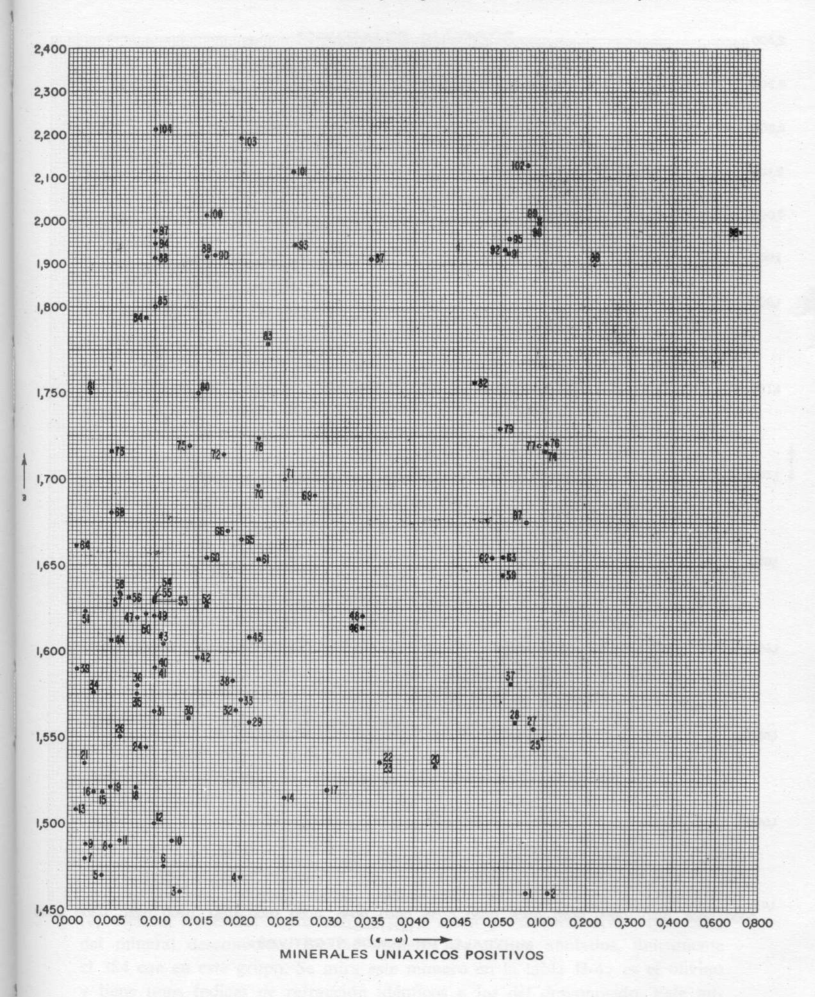



FIGURA II-1

**Diagrama para determinar minerales uniáxicos positivos. Consúltese la tabla II-2 para identificar el número de código.**

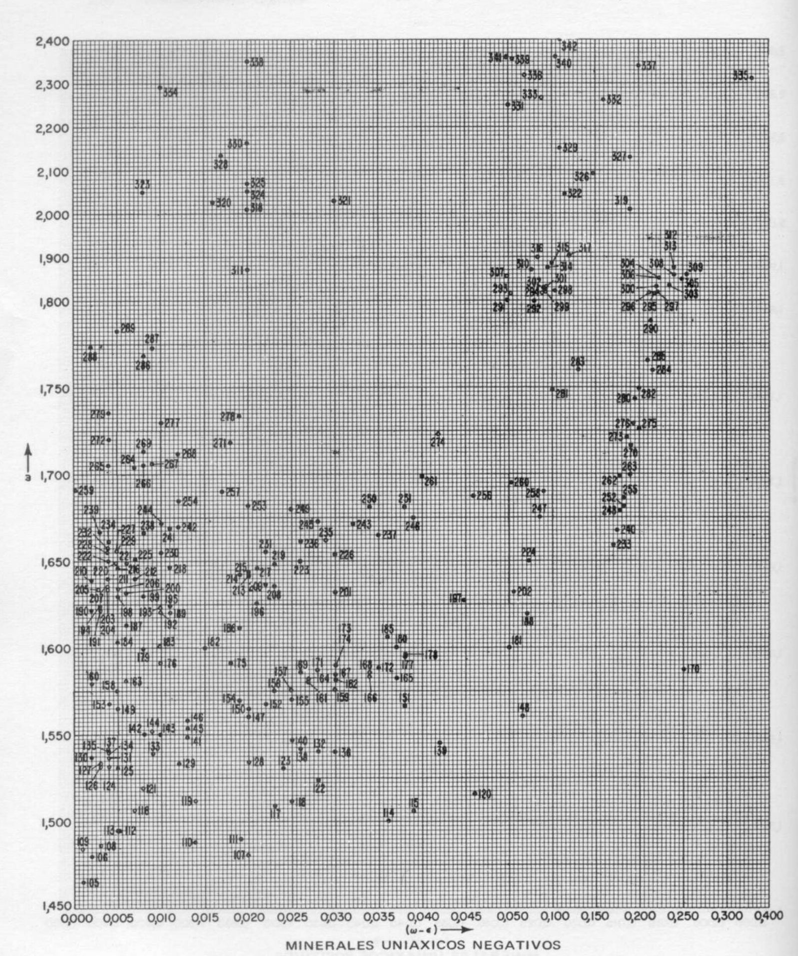



FIGURA II-2

**Diagrama para determinar minerales uniáxicos negativos. Consúltese la tabla II-2 para identificar el número de código.**

# MINERALES BIÁXICOS

Las tablas II-3 y II-4 presentan, respectivamente, los minerales biáxicos positivos y negativos, ordenados por valores crecientes de $\beta$; se ha asignado a cada mineral un número de código (columna de la izquierda). Los minerales biáxicos positivos están representados en las figuras II-3 a II-5, siendo $(\gamma - \alpha)$ y $(\beta - \alpha)$ las coordenadas del punto donde está escrito el número de código del mineral. Los números de código de los minerales biáxicos negativos están representados en las figuras II-6 a II-8 por puntos de coordenadas $(\gamma - \alpha)$ y $(\gamma - \beta)$. Las líneas inclinadas indican los diferentes valores de $2V$ con una precisión de 3 a 5 grados. De esta forma, si se han calculado los valores $\alpha$, $\beta$ y $\gamma$ y el signo óptico de un mineral biáxico desconocido, estos datos definen un punto en uno de los dos gráficos. Si se coloca sobre este punto un cuadrado de lado igual a 0,004, contendrá, probablemente, el número de código del mineral, siempre que no sea una especie extraordinariamente rara. Pueden quedar dentro de este cuadrado varios números de código. Deben anotarse aparte, aunque muchos de ellos pueden eliminarse inmediatamente si son números que no están comprendidos dentro del mismo «en torno a $\beta$», definido por la medida del valor de $\beta$. Para mayor comodidad, estos «en tornos» están reunidos en cuadros anexos colocados en la parte superior izquierda de las figuras II-3 a II-8. Los números de código quedan así reducidos a escasas posibilidades. La comparación de las propiedades detalladas de estos posibles minerales (dadas por Winchell y Winchell, 1951) con las del desconocido, permiten con frecuencia una identificación inequívoca. Tales datos comparativos adicionales pueden ser: densidad, ángulo de extinción, signo de elongación y efectos de dispersión observados en la figura de interferencia. Las figuras II-3 a II-5 están en las págs. 293, 294 y 295; las figuras II-6 a II-8, en las págs. 308, 309 y 310.

## Ejemplo del empleo de las tablas biáxicas

Suponiendo que las constantes ópticas de un mineral desconocido son $\alpha = 1{,}681$, $\beta = 1{,}706$, $\gamma = 1{,}718$, (—). Los valores $(\gamma - \alpha)$ y $(\gamma - \beta)$ —0,037 y 0,012 respectivamente— determinan un punto en la figura II-7. Se anotarán aquellos números de código (o sea, 308, 384, 444, 451, 453, 454 y 457) que aparecen en un radio de 0,002 (en todas direcciones) del punto dado. Obsérvese, sin embargo, en el cuadro «en torno de valores de $\beta$» en la figura II-7, que únicamente los números de código desde 377 al 426 de la tabla II-4 representan minerales cuyos valores de $\beta$ están próximos a 1,706, que es el del mineral desconocido. De los números de código anotados, únicamente el 384 cae en este grupo. Se mira este número en la tabla II-4; es el olivino y tiene unos índices de refracción idénticos a los del desconocido. Este mineral desconocido es, por lo tanto, un ejemplar de olivino; es conveniente consultar Winchell y Winchell (1951, pág. 498) para obtener una descripción más amplia del olivino y poderlo comparar plenamente con las propiedades del mineral desconocido.

## TABLA II-3

LISTA DE MINERALES BIÁXICOS POSITIVOS
(dispuestos en orden creciente de $\beta$)

| *N.º de código* | $\beta$ | $\alpha$ | $\gamma$ | *Nombre* |
|---|---|---|---|---|
| *1* | 1,413 | 1,411 | 1,420 | Pachnolita |
| *2* | 1,44 | 1,438 | 1,452 | Erionita |
| *3* | 1,441 | 1,439 | 1,469 | Stercorita |
| *4* | 1,448 | 1,447 | 1,459 | Taylorita |
| *5* | 1,463 | 1,461 | 1,476 | Picromerita |
| *6* | 1,464 | 1,459 | 1,470 | Aluminita |
| *7* | 1,468 | 1,456 | 1,507 | Lansfordita |
| *8* | 1,470 | 1,469 | 1,479 | Boussingaulita |
| *9* | 1,47 | 1,469 | 1,473 | Tridimita |
| *10* | 1,472 | 1,471 | 1,474 | Tridimita |
| *11* | 1,472 | 1,467 | 1,497 | Carnalita |
| *12* | 1,473 | 1,468 | 1,481 | Thenardita |
| *13* | 1,474 | 1,467 | 1,496 | Carnalita |
| *14* | 1,474 | 1,464 | 1,485 | Thenardita |
| *15* | 1,474 | 1,472 | 1,476 | Mordenita |
| *16* | 1,475 | 1,467 | 1,494 | Carnalita |
| *17* | 1,476 | 1,474 | 1,483 | Alunogeno |
| *18* | 1,476 | 1,474 | 1,478 | Arduinita |
| *19* | 1,476 | 1,473 | 1,485 | Natrolita |
| *20* | 1,477 | 1,471 | 1,484 | Thenardita |
| *21* | 1,478 | 1,471 | 1,486 | Melanterita |
| *22* | 1,479 | 1,478 | 1,481 | Tridimita |
| *23* | 1,479 | 1,478 | 1,482 | Ferrierita |
| *24* | 1,479 | 1,472 | 1,487 | Pisanita |
| *25* | 1,48 | 1,47 | 1,49 | Boothita |
| *26* | 1,480 | 1,479 | 1,483 | Tridimita |
| *27* | 1,480 | 1,475 | 1,487 | Misenita |
| *28* | 1,480 | 1,475 | 1,488 | Dietrichita |
| *29* | 1,482 | 1,480 | 1,493 | Natrolita |
| *30* | 1,482 | 1,481 | 1,486 | Ashtonita |
| *31* | 1,483 | 1,479 | 1,488 | Melanterita, Zn - Cu |
| *32* | 1,485 | 1,485 | 1,488 | Chabasita |
| *33* | 1,485 | 1,482 | 1,489 | Heulandita |
| *34* | 1,486 | 1,484 | 1,502 | Cianocroita |
| *35* | 1,487 | 1,484 | 1,496 | Tamarugita |
| *36* | 1,487 | 1,470 | 1,540 | Ammonioborita |
| *37* | 1,490 | 1,473 | 1,511 | Fluellita |
| *38* | 1,494 | 1,493 | 1,497 | Arcanita |
| *39* | 1,495 | 1,489 | 1,506 | Kreuzbergita |
| *40* | 1,496 | 1,495 | 1,504 | Struvita |

TABLA II-3 *(continuación)*

LISTA DE MINERALES BIÁXICOS POSITIVOS

| *N.º de código* | β | α | γ | *Nombre* |
|---|---|---|---|---|
| *41* | 1,496 | 1,492 | 1,500 | Dachiardita |
| *42* | 1,497 | 1,496 | 1,501 | Heulandita |
| *43* | 1,499 | 1,498 | 1,505 | Heulandita |
| *44* | 1,500 | 1,498 | 1,503 | Phillipsita |
| *45* | 1,50 | 1,498 | 1,503 | Wellsita |
| *46* | 1,503 | 1,499 | 1,538 | Uranotalita |
| *47* | 1,503 | 1,501 | 1,510 | Prosopita |
| *48* | 1,504 | 1,493 | 1,517 | Crisotilo |
| *49* | 1,504 | 1,491 | 1,520 | Ulexita |
| *50* | 1,505 | 1,503 | 1,508 | Harmotoma |
| *51* | 1,505 | 1,496 | 1,519 | Ulexita |
| *52* | 1,505 | 1,505 | 1,506 | Mesolita |
| *53* | 1,507 | 1,494 | 1,528 | Bischofita |
| *54* | 1,507 | 1,507 | 1,508 | Mesolita |
| *55* | 1,508 | 1,504 | 1,545 | Ussingita |
| *56* | 1,509 | 1,493 | 1,561 | Larderelita |
| *57* | 1,510 | 1,504 | 1,575 | Pirssonita |
| *58* | 1,510 | 1,504 | 1,516 | Petalita |
| *59* | 1,512 | 1,510 | 1,523 | Brewsterita |
| *60* | 1,512 | 1,508 | 1,522 | Crisotilo |
| *61* | 1,512 | 1,505 | 1,524 | Flagstaffita |
| *62* | 1,513 | 1,511 | 1,518 | Thomsonita |
| *63* | 1,513 | 1,512 | 1,518 | Faroelita |
| *64* | 1,518 | 1,514 | 1,533 | Newberyita |
| *65* | 1,518 | 1,516 | 1,533 | Felsobanyita |
| *66* | 1,520 | 1,510 | 1,543 | Bobierita |
| *67* | 1,523 | 1,520 | 1,530 | Yeso |
| *68* | 1,523 | 1,521 | 1,530 | Yeso |
| *69* | 1,523 | 1,521 | 1,533 | Mascagnita |
| *70* | 1,523 | 1,518 | 1,588 | Hatchettita |
| *71* | 1,525 | 1,515 | 1,544 | Probertita |
| *72* | 1,525 | 1,520 | 1,540 | Thomsonita |
| *73* | 1,525 | 1,521 | 1,545 | Spadaita |
| *74* | 1,525 | 1,523 | 1,532 | Calcoalumita |
| *75* | 1,526 | 1,508 | 1,550 | Kaliborita |
| *76* | 1,527 | 1,523 | 1,545 | Hidromagnesita |
| *77* | 1,528 | 1,509 | 1,548 | Paternoita |
| *78* | 1,529 | 1,507 | 1,573 | Copiapita |
| *79* | 1,529 | 1,525 | 1,536 | Albita |
| *80* | 1,529 | 1,522 | 1,577 | Botryogeno |

TABLA II-3 *(continuación)*

LISTA DE MINERALES BIÁXICOS POSITIVOS

| *N.º de código* | β | α | γ | *Nombre* |
|---|---|---|---|---|
| *81* | 1,530 | 1,522 | 1,544 | Tavistoquita |
| *82* | 1,532 | 1,529 | 1,539 | Albita |
| *83* | 1,533 | 1,520 | 1,584 | Kieserita |
| *84* | 1,534 | 1,533 | 1,575 | Fibroferrita |
| *85* | 1,534 | 1,523 | 1,570 | Hidroboracita |
| *86* | 1,534 | 1,525 | 1,552 | Wavelita |
| *87* | 1,540 | 1,536 | 1,544 | Albiclasa |
| *88* | 1,543 | 1,542 | 1,555 | Crisotilo |
| *89* | 1,543 | 1,534 | 1,588 | Gordonita |
| *90* | 1,543 | 1,535 | 1,561 | Wavelita |
| *91* | 1,543 | 1,530 | 1,595 | Copiapita |
| *92* | 1,544 | 1,544 | 1,546 | Epididimita |
| *93* | 1,545 | 1,539 | 1,551 | Brushita |
| *94* | 1,546 | 1,545 | 1,551 | Eudidimita |
| *95* | 1,547 | 1,541 | 1,564 | Voglita |
| *96* | 1,550 | 1,546 | 1,557 | Crisotilo |
| *97* | 1,550 | 1,530 | 1,597 | Copiapita |
| *98* | 1,553 | 1,550 | 1,557 | Andesina |
| *99* | 1,555 | 1,546 | 1,587 | Bombicita |
| *100* | 1,555 | 1,551 | 1,562 | Vauxita |
| *101* | 1,556 | 1,553 | 1,560 | Andesina |
| *102* | 1,558 | 1,554 | 1,573 | Paravauxita |
| *103* | 1,558 | 1,544 | 1,581 | Louderbaquita |
| *104* | 1,558 | 1,551 | 1,582 | Metaváriscita |
| *105* | 1,559 | 1,555 | 1,563 | Anemousita |
| *106* | 1,560 | 1,557 | 1,565 | Labradorita |
| *107* | 1,561 | 1,550 | 1,577 | Metavauxita |
| *108* | 1,562 | 1,560 | 1,566 | Dickita |
| *109* | 1,563 | 1,561 | 1,567 | Dickita |
| *110* | 1,563 | 1,559 | 1,568 | Labradorita |
| *111* | 1,565 | 1,560 | 1,574 | Elpidita |
| *112* | 1,565 | 1,561 | 1,570 | Labratownita |
| *113* | 1,566 | 1,560 | 1,581 | Humita |
| *114* | 1,566 | 1,566 | 1,587 | Gibbsita |
| *115* | 1,566 | 1,547 | 1,594 | Quenstedtita |
| *116* | 1,567 | 1,563 | 1,590 | Norbergita |
| *117* | 1,568 | 1,565 | 1,580 | Isoclasita |
| *118* | 1,57 | 1,555 | 1,585 | Tengerita |
| *119* | 1,570 | 1,570 | 1,586 | Gibbsita |
| *120* | 1,570 | 1,569 | 1,582 | Wagnerita |

TABLA II-3 *(continuación)*

LISTA DE MINERALES BIÁXICOS POSITIVOS

| *N.º de código* | *β* | *α* | *γ* | *Nombre* |
|---|---|---|---|---|
| *121* | 1,571 | 1,571 | 1,576 | Clinocloro |
| *122* | 1,571 | 1,563 | 1,596 | Hoernesita |
| *123* | 1,575 | 1,575 | 1,590 | Leuchtenbergita |
| *124* | 1,575 | 1,570 | 1,614 | Anhidrita |
| *125* | 1,576 | 1,570 | 1,614 | Anhidrita |
| *126* | 1,576 | 1,576 | 1,579 | Penninita |
| *127* | 1,576 | 1,574 | 1,588 | Augelita |
| *128* | 1,579 | 1,576 | 1,597 | Cookeita |
| *129* | 1,579 | 1,579 | 1,584 | Clinocloro |
| *130* | 1,580 | 1,578 | 1,586 | Sheridanita |
| *131* | 1,581 | 1,567 | 1,638 | Kornelita |
| *132* | 1,581 | 1,578 | 1,588 | Clorita |
| *133* | 1,583 | 1,583 | 1,595 | Zonotlita |
| *134* | 1,585 | 1,583 | 1,590 | Bavenita |
| *135* | 1,585 | 1,578 | 1,591 | Anthofilita |
| *136* | 1,586 | 1,586 | 1,595 | Wardita |
| *137* | 1,589 | 1,588 | 1,599 | Proclorita |
| *138* | 1,589 | 1,584 | 1,594 | Celsiana |
| *139* | 1,590 | 1,587 | 1,597 | Custerita |
| *140* | 1,590 | 1,587 | 1,597 | Bulfonteinita |
| *141* | 1,591 | 1,560 | 1,631 | Hambergita |
| *142* | 1,592 | 1,591 | 1,627 | Catapleiita |
| *143* | 1,592 | 1,586 | 1,614 | Colemanita |
| *144* | 1,595 | 1,590 | 1,602 | Cuspidina |
| *145* | 1,595 | 1,562 | 1,632 | Szmikita |
| *146* | 1,596 | 1,577 | 1,616 | Johannita |
| *147* | 1,597 | 1,597 | 1,612 | Amesita |
| *148* | 1,598 | 1,580 | 1,627 | Vivianita |
| *149* | 1,600 | 1,570 | 1,636 | Vivianita |
| *150* | 1,60(5) | 1,595 | 1,628 | Cebollita |
| *151* | 1,602 | 1,590 | 1,638 | Haidingerita |
| *152* | 1,603 | 1,594 | 1,615 | Fremontita |
| *153* | 1,603 | 1,579 | 1,633 | Vivianita |
| *154* | 1,604 | 1,595 | 1,633 | Pectolita |
| *155* | 1,605 | 1,600 | 1,636 | Pectolita |
| *156* | 1,605 | 1,600 | 1,613 | Hidrofilita |
| *157* | 1,606 | 1,599 | 1,621 | Scawtita |
| *158* | 1,606 | 1,606 | 1,610 | Proclorita |
| *159* | 1,607 | 1,605 | 1,613 | Corundofilita |
| *160* | 1,608 | 1,600 | 1,645 | Weinschenkita |

TABLA II-3 *(continuación)*

LISTA DE MINERALES BIÁXICOS POSITIVOS

| *N.º de código* | $\beta$ | $\alpha$ | $\gamma$ | *Nombre* |
|---|---|---|---|---|
| *161* | 1,610 | 1,607 | 1,618 | Topacio |
| *162* | 1,610 | 1,604 | 1,636 | Pectolita |
| *163* | 1,612 | 1,612 | 1,616 | Afrosiderita |
| *164* | 1,613 | 1,602 | 1,649 | Anapaita |
| *165* | 1,613 | 1,609 | 1,619 | Stokesita |
| *166* | 1,613 | 1,606 | 1,623 | Tremolita, sódica |
| *167* | 1,613 | 1,603 | 1,626 | Amblygonita |
| *168* | 1,614 | 1,607 | 1,630 | Montebrasita |
| *169* | 1,614 | 1,600 | 1,631 | Monetita |
| *170* | 1,614 | 1,610 | 1,642 | Pectolita |
| *171* | 1,615 | 1,612 | 1,624 | Zippeita |
| *172* | 1,616 | 1,613 | 1,623 | Topacio |
| *173* | 1,617 | 1,614 | 1,636 | Calamina |
| *174* | 1,617 | 1,588 | 1,655 | Cinotricita |
| *175* | 1,617 | 1,604 | 1,636 | Condrodita |
| *176* | 1,618 | 1,616 | 1,625 | Topacio |
| *177* | 1,618 | 1,618 | 1,621 | Ripidolita |
| *178* | 1,618 | 1,612 | 1,642 | Prehnita |
| *179* | 1,619 | 1,614 | 1,633 | Edenita |
| *180* | 1,62 | 1,61 | 1,65 | Turquesa |
| *181* | 1,620 | 1,619 | 1,627 | Topacio |
| *182* | 1,620 | 1,620 | 1,654 | Churquita |
| *183* | 1,620 | 1,617 | 1,634 | Afwillita |
| *184* | 1,621 | 1,614 | 1,641 | Prehnita |
| *185* | 1,621 | 1,616 | 1,635 | Pargasita |
| *186* | 1,621 | 1,620 | 1,630 | Zippeita |
| *187* | 1,622 | 1,618 | 1,658 | Arakawaita |
| *188* | 1,623 | 1,613 | 1,636 | Ambligonita |
| *189* | 1,623 | 1,613 | 1,643 | Condrodita |
| *190* | 1,623 | 1,622 | 1,631 | Celestita |
| *191* | 1,624 | 1,622 | 1,642 | Scorodita |
| *192* | 1,624 | 1,622 | 1,631 | Celestita |
| *193* | 1,624 | 1,615 | 1,644 | Prehnita |
| *194* | 1,625 | 1,615 | 1,645 | Prehnita |
| *195* | 1,625 | 1,615 | 1,665 | Destinezita |
| *196* | 1,625 | 1,614 | 1,637 | Parahopeita |
| *197* | 1,626 | 1,616 | 1,649 | Prehnita |
| *198* | 1,629 | 1,626 | 1,652 | Prehnita |
| *199* | 1,630 | 1,630 | 1,635 | Clorita |
| *200* | 1,630 | 1,622 | 1,645 | Edenita |

TABLA II-3 *(continuación)*

LISTA DE MINERALES BIÁXICOS POSITIVOS

| *N.º de código* | β | α | γ | *Nombre* |
|---|---|---|---|---|
| *201* | 1,630 | 1,619 | 1,650 | Condrodita |
| *202* | 1,630 | 1,623 | 1,684 | Guildita |
| *203* | 1,631 | 1,629 | 1,638 | Topacio |
| *204* | 1,632 | 1,622 | 1,652 | Humita |
| *205* | 1,632 | 1,631 | 1,640 | Picrofarmacolita |
| *206* | 1,633 | 1,633 | 1,635 | Ripidolita |
| *207* | 1,634 | 1,627 | 1,646 | Cummingtonita |
| *208* | 1,634 | 1,623 | 1,655 | Humita |
| *209* | 1,635 | 1,617 | 1,652 | Tilleyita |
| *210* | 1,635 | 1,613 | 1,657 | Sklodowskita |
| *211* | 1,636 | 1,631 | 1,660 | Squizolita |
| *212* | 1,636 | 1,623 | 1,651 | Clinohumita |
| *213* | 1,637 | 1,636 | 1,648 | Barita |
| *214* | 1,638 | 1,633 | 1,652 | Antofilita |
| *215* | 1,638 | 1,625 | 1,653 | Clinohumita |
| *216* | 1,638 | 1,633 | 1,652 | Pargasita |
| *217* | 1,640 | 1,640 | 1,657 | Sarcolita |
| *218* | 1,642 | 1,638 | 1,653 | Mullita |
| *219* | 1,642 | 1,632 | 1,657 | Collinsita |
| *220* | 1,642 | 1,632 | 1,665 | Ferriprehnita |
| *221* | 1,642 | 1,632 | 1,665 | Prehnita |
| *222* | 1,642 | 1,640 | 1,647 | Juanita |
| *223* | 1,643 | 1,631 | 1,695 | Ransomita |
| *224* | 1,644 | 1,641 | 1,650 | Rankinita |
| *225* | 1,644 | 1,632 | 1,664 | Clinohumita |
| *226* | 1,644 | 1,636 | 1,654 | Fairfieldita |
| *227* | 1,644 | 1,642 | 1,654 | Mullita |
| *228* | 1,645 | 1,635 | 1,663 | Condrodita |
| *229* | 1,645 | 1,643 | 1,651 | Rinkolita |
| *230* | 1,648 | 1,637 | 1,676 | Loseyita |
| *231* | 1,649 | 1,646 | 1,658 | Mosandrita |
| *232* | 1,650 | 1,639 | 1,667 | Cummingtonita |
| *233* | 1,650 | 1,640 | 1,660 | Fairfieldita |
| *234* | 1,651 | 1,636 | 1,669 | Forsterita |
| *235* | 1,651 | 1,635 | 1,670 | Forsterita |
| *236* | 1,653 | 1,650 | 1,658 | Enstatita |
| *237* | 1,653 | 1,643 | 1,675 | Humita |
| *238* | 1,653 | 1,640 | 1,680 | Messelita |
| *239* | 1,653 | 1,651 | 1,665 | Triplita |
| *240* | 1,654 | 1,651 | 1,660 | Clinoenstatita |

TABLA II-3 *(continuación)*

LISTA DE MINERALES BIÁXICOS POSITIVOS

| *N.º de código* | *β* | *α* | *γ* | *Nombre* |
|---|---|---|---|---|
| *241* | 1,655 | 1,655 | 1,662 | Uranocalcita |
| *242* | 1,655 | 1,648 | 1,662 | Dickinsonita, spodumena |
| *243* | 1,655 | 1,643 | 1,670 | Condrodita |
| *244* | 1,655 | 1,642 | 1,661 | Anthofilita |
| *245* | 1,656 | 1,653 | 1,673 | Euclasa |
| *246* | 1,656 | 1,649 | 1,714 | Natrocalcita |
| *247* | 1,656 | 1,651 | 1,683 | Reddingita |
| *248* | 1,658 | 1,652 | 1,665 | Hiortdalita |
| *249* | 1,658 | 1,655 | 1,667 | Espodumena |
| *250* | 1,658 | 1,640 | 1,695 | Veszelita |
| *251* | 1,659 | 1,653 | 1,677 | Espodumena |
| *252* | 1,659 | 1,654 | 1,667 | Jadeita |
| *253* | 1,660 | 1,656 | 1,672 | Espodumena |
| *254* | 1,660 | 1,650 | 1,672 | Triplita |
| *255* | 1,660 | 1,657 | 1,667 | Enstatita |
| *256* | 1,660 | 1,650 | 1,680 | Barrandita |
| *257* | 1,660 | 1,645 | 1,715 | Plancheita |
| *258* | 1,660 | 1,659 | 1,680 | Silimanita |
| *259* | 1,661 | 1,645 | 1,688 | Leucosfenita |
| *260* | 1,661 | 1,640 | 1,680 | Forsterita |
| *261* | 1,662 | 1,658 | 1,671 | Dickinsonita |
| *262* | 1,662 | 1,658 | 1,668 | Boracita |
| *263* | 1,662 | 1,655 | 1,683 | Reddingita |
| *264* | 1,664 | 1,660 | 1,688 | Serandita |
| *265* | 1,666 | 1,661 | 1,673 | Johnstrupita |
| *266* | 1,666 | 1,663 | 1,673 | Litiofilita |
| *267* | 1,666 | 1,660 | 1,676 | Espodumena |
| *268* | 1,667 | 1,644 | 1,716 | Planqueita |
| *269* | 1,667 | 1,653 | 1,678 | Espodumena |
| *270* | 1,667 | 1,662 | 1,673 | Boracita |
| *271* | 1,668 | 1,665 | 1,681 | Rinkita |
| *272* | 1,669 | 1,655 | 1,670 | Cummingtonita |
| *273* | 1,669 | 1,665 | 1,674 | Enstatita |
| *274* | 1,670 | 1,658 | 1,690 | Titanohidroclinohumita |
| *275* | 1,670 | 1,661 | 1,684 | Silimanita |
| *276* | 1,670 | 1,653 | 1,689 | Olivino |
| *277* | 1,671 | 1,662 | 1,691 | Viridina |
| *278* | 1,671 | 1,670 | 1,689 | Hinsdalita |
| *279* | 1,671 | 1,664 | 1,694 | Diopsido |
| *280* | 1,672 | 1,669 | 1,677 | Clorofenicita, magnésica |

TABLA II-3 *(continuación)*

LISTA DE MINERALES BIÁXICOS POSITIVOS

| *N.º de código* | *β* | *α* | *γ* | *Nombre* |
|---|---|---|---|---|
| *281* | 1,672 | 1,672 | 1,676 | Filovita |
| *282* | 1,673 | 1,665 | 1,682 | Triplita |
| *283* | 1,673 | 1,664 | 1,698 | Clinohumita |
| *284* | 1,674 | 1,671 | 1,684 | Natrofilita |
| *285* | 1,674 | 1,663 | 1,699 | Espodiosita |
| *286* | 1,674 | 1,665 | 1,684 | Lawsonita |
| *287* | 1,674 | 1,666 | 1,688 | Diopsido - jadeita |
| *288* | 1,675 | 1,666 | 1,688 | Anthofilita ferrífera |
| *289* | 1,675 | 1,653 | 1,697 | Ludlamita |
| *290* | 1,676 | 1,672 | 1,683 | Akrocordita |
| *291* | 1,678 | 1,669 | 1,700 | Reddingita ferrífera |
| *292* | 1,678 | 1,655 | 1,700 | Clinohumita |
| *293* | 1,678 | 1,673 | 1,683 | Hiperstena |
| *294* | 1,679 | 1,676 | 1,687 | Litiofilita |
| *295* | 1,680 | 1,679 | 1,692 | Pumpellita |
| *296* | 1,681 | 1,663 | 1,700 | Olivino |
| *297* | 1,683 | 1,675 | 1,692 | Triplita |
| *298* | 1,683 | 1,662 | 1,717 | Koettigita |
| *299* | 1,683 | 1,676 | 1,705 | Shefferita de zinc |
| *300* | 1,685 | 1,678 | 1,703 | Leucaugita |
| *301* | 1,686 | 1,681 | 1,698 | Titanoelpidita |
| *302* | 1,687 | 1,686 | 1,693 | Trifilita |
| *303* | 1,687 | 1,682 | 1,711 | Rosenbushita |
| *304* | 1,688 | 1,679 | 1,710 | Urbanita |
| *305* | 1,688 | 1,688 | 1,692 | Trifilita |
| *306* | 1,688 | 1,685 | 1,698 | Thulita |
| *307* | 1,690 | 1,682 | 1,698 | Clorofenicita |
| *308* | 1,690 | 1,670 | 1,706 | Cummingtonita |
| *309* | 1,690 | 1,682 | 1,710 | Jeffersonita |
| *310* | 1,691 | 1,690 | 1,711 | Pigeonita |
| *311* | 1,692 | 1,687 | 1,709 | Fowlerita |
| *312* | 1,694 | 1,687 | 1,713 | Augita |
| *313* | 1,695 | 1,694 | 1,702 | Trifilita |
| *314* | 1,696 | 1,691 | 1,703 | Barylita |
| *315* | 1,696 | 1,696 | 1,702 | Zoisita |
| *316* | 1,698 | 1,695 | 1,733 | Eucroita |
| *317* | 1,699 | 1,690 | 1,736 | Neptunita |
| *318* | 1,699 | 1,690 | 1,721 | Schefferita |
| *319* | 1,699 | 1,692 | 1,721 | Salita |
| *320* | 1,700 | 1,691 | 1,724 | Clinohumita |

TABLA II-3 *(continuación)*

LISTA DE MINERALES BIÁXICOS POSITIVOS

| N.º de código | β | α | γ | Nombre |
|---|---|---|---|---|
| 321 | 1,700 | 1,697 | 1,703 | Riebeckita |
| 322 | 1,70 | 1,695 | 1,722 | Gadolinita |
| 323 | 1,702 | 1,696 | 1,714 | Augita |
| 324 | 1,702 | 1,700 | 1,706 | Zoisita |
| 325 | 1,703 | 1,701 | 1,706 | Serendibita |
| 326 | 1,703 | 1,700 | 1,718 | Zoisita |
| 327 | 1,704 | 1,696 | 1,713 | Triplita |
| 328 | 1,705 | 1,700 | 1,724 | Graftonita |
| 329 | 1,705 | 1,691 | 1,738 | Astrofilita |
| 330 | 1,705 | 1,691 | 1,735 | Astrofilita |
| 331 | 1,706 | 1,700 | 1,724 | Augita |
| 332 | 1,707 | 1,700 | 1,718 | Pumpellita |
| 333 | 1,708 | 1,702 | 1,726 | Diopsido - hedenbergita |
| 334 | 1,708 | 1,708 | 1,745 | Estrengita |
| 335 | 1,709 | 1,702 | 1,741 | Legrandita |
| 336 | 1,710 | 1,705 | 1,725 | Thulita |
| 337 | 1,711 | 1,708 | 1,718 | Merwinita |
| 338 | 1,711 | 1,709 | 1,724 | Brandtita |
| 339 | 1,712 | 1,706 | 1,724 | Merwinita |
| 340 | 1,713 | 1,713 | 1,738 | Pigeonita |
| 341 | 1,713 | 1,703 | 1,722 | Gerhardtita |
| 342 | 1,714 | 1,704 | 1,735 | Ferrosalita |
| 343 | 1,714 | 1,714 | 1,744 | Pigeonita |
| 344 | 1,715 | 1,707 | 1,730 | Larnita |
| 345 | 1,715 | 1,711 | 1,724 | Rhodonita |
| 346 | 1,717 | 1,715 | 1,719 | Clinozoisita |
| 347 | 1,718 | 1,715 | 1,733 | Ortita magnésica |
| 348 | 1,718 | 1,699 | 1,742 | Augita |
| 349 | 1,719 | 1,717 | 1,741 | Pigeonita |
| 350 | 1,719 | 1,710 | 1,738 | Johannsenita |
| 351 | 1,719 | 1,715 | 1,737 | Cloritoide |
| 352 | 1,720 | 1,710 | 1,736 | Hedenbergita, Mn |
| 353 | 1,720 | 1,715 | 1,725 | Clinozoisita |
| 354 | 1,720 | 1,718 | 1,723 | Clinozoisita |
| 355 | 1,720 | 1,716 | 1,728 | Rhodonita |
| 356 | 1,721 | 1,712 | 1,731 | Adelita |
| 357 | 1,722 | 1,702 | 1,750 | Diaspora |
| 358 | 1,722 | 1,713 | 1,745 | Jeffersonita |
| 359 | 1,722 | 1,720 | 1,731 | Cloritoide |
| 360 | 1,725 | 1,722 | 1,728 | Cloritoide |

TABLA II-3 *(continuación)*

LISTA DE MINERALES BIÁXICOS POSITIVOS

| *N.º de código* | $\beta$ | $\alpha$ | $\gamma$ | *Nombre* |
|---|---|---|---|---|
| *361* | 1,725 | 1,715 | 1,738 | Homilita |
| *362* | 1,725 | 1,721 | 1,746 | Titanaugita |
| *363* | 1,726 | 1,724 | 1,737 | Cloritoide |
| *364* | 1,726 | 1,725 | 1,730 | Triploidita |
| *365* | 1,728 | 1,725 | 1,737 | Rhodonita férrica |
| *366* | 1,730 | 1,726 | 1,737 | Fowlerita |
| *367* | 1,730 | 1,717 | 1,752 | Babingtonita |
| *368* | 1,730 | 1,718 | 1,751 | Roselita |
| *369* | 1,730 | 1,725 | 1,746 | Augita, Ti |
| *370* | 1,732 | 1,726 | 1,753 | Ferroaugita |
| *371* | 1,732 | 1,730 | 1,762 | Estrengita |
| *372* | 1,732 | 1,726 | 1,751 | Hedenbergita |
| *373* | 1,735 | 1,726 | 1,752 | Hedenbergita |
| *374* | 1,737 | 1,733 | 1,747 | Rhodonita |
| *375* | 1,738 | 1,726 | 1,789 | Antlerita |
| *376* | 1,740 | 1,739 | 1,760 | Ardennita |
| *377* | 1,740 | 1,732 | 1,757 | Hedenbergita |
| *378* | 1,741 | 1,736 | 1,746 | Estaurolita |
| *379* | 1,742 | 1,738 | 1,765 | Escorodita |
| *380* | 1,744 | 1,739 | 1,750 | Estaurolita |
| *381* | 1,745 | 1,739 | 1,751 | Estaurolita |
| *382* | 1,746 | 1,745 | 1,765 | Astrofilita |
| *383* | 1,747 | 1,744 | 1,773 | Molengraafita |
| *384* | 1,748 | 1,747 | 1,757 | Crisoberilo |
| *385* | 1,750 | 1,744 | 1,756 | Estaurolita |
| *386* | 1,754 | 1,747 | 1,762 | Estaurolita |
| *387* | 1,754 | 1,745 | 1,780 | Lamprofilita |
| *388* | 1,758 | 1,730 | 1,838 | Azurita |
| *389* | 1,763 | 1,762 | 1,765 | Dewindtita |
| *390* | 1,764 | 1,746 | 1,806 | Piedmontita |
| *391* | 1,765 | 1,739 | 1,799 | Piedmontita |
| *392* | 1,770 | 1,769 | 1,785 | Holdenita |
| *393* | 1,772 | 1,754 | 1,795 | Piedmontita |
| *394* | 1,774 | 1,765 | 1,797 | Escorodita (?) |
| *395* | 1,774 | 1,770 | 1,783 | Barthita |
| *396* | 1,776 | 1,758 | 1,795 | Orientita |
| *397* | 1,780 | 1,776 | 1,805 | Carinita |
| *398* | 1,782 | 1,752 | 1,815 | Shattuckita |
| *399* | 1,786 | 1,775 | 1,815 | Beraunita |
| *400* | 1,787 | 1,785 | 1,840 | Monazita |

TABLA II-3 *(continuación)*

LISTA DE MINERALES BIÁXICOS POSITIVOS

| *N.º de código* | *β* | *α* | *γ* | *Nombre* |
|---|---|---|---|---|
| *401* | 1,788 | 1,783 | 1,818 | Lossenita ( = Beudantita) |
| *402* | 1,788 | 1,777 | 1,800 | Retziana |
| *403* | 1,788 | 1,786 | 1,837 | Monazita |
| *404* | 1,789 | 1,756 | 1,829 | Piedmontita |
| *405* | 1,794 | 1,794 | 1,803 | Arseniopleita |
| *406* | 1,795 | 1,780 | 1,815 | Barthita |
| *407* | 1,796 | 1,784 | 1,814 | Escorodita |
| *408* | 1,801 | 1,800 | 1,849 | Monazita |
| *409* | 1,801 | 1,783 | 1,834 | Flinkita |
| *410* | 1,805 | 1,78 | 1,82 | Tefroita |
| *411* | 1,810 | 1,772 | 1,863 | Olivenita |
| *412* | 1,810 | 1,808 | 1,830 | Warwickita |
| *413* | 1,812 | 1,801 | 1,824 | Gadolinita |
| *414* | 1,818 | 1,817 | 1,821 | Cerita |
| *415* | 1,820 | 1,780 | 1,865 | Olivenita |
| *416* | 1,827 | 1,792 | 1,864 | Iddingsita |
| *417* | 1,840 | 1,830 | 1,885 | Dufrenita |
| *418* | 1,852 | 1,845 | 1,878 | Toernebohmita |
| *419* | 1,870 | 1,843 | 1,943 | Esfena |
| *420* | 1,880 | 1,873 | 1,895 | Rockbridgeita |
| *421* | 1,882 | 1,877 | 1,894 | Anglesita |
| *422* | 1,883 | 1,878 | 1,895 | Anglesita |
| *423* | 1,910 | 1,895 | 1,950 | Kasolita |
| *424* | 1,920 | 1,885 | 1,956 | Tsumebita |
| *425* | 1,92 | 1,87 | 2,01 | Claudetita |
| *426* | 1,963 | 1,963 | 1,966 | Hialotequita |

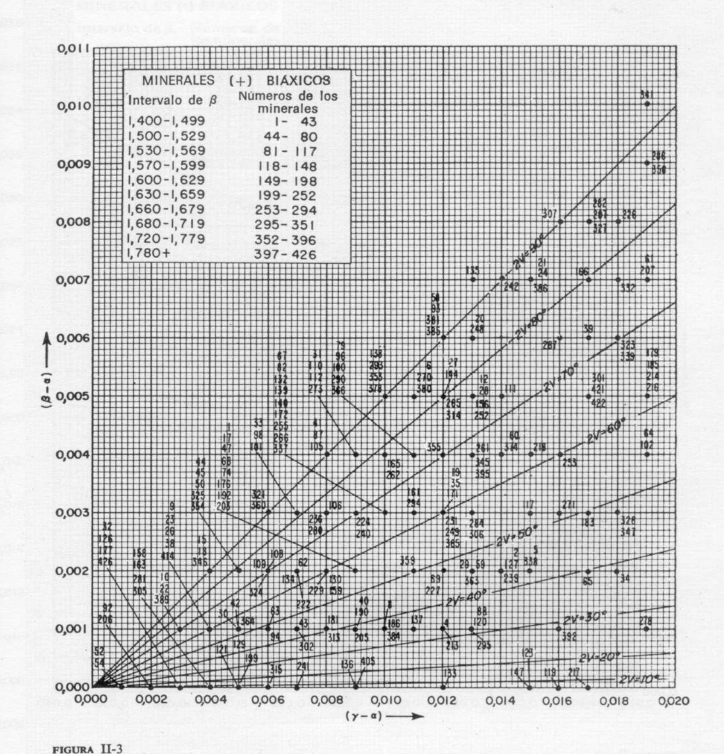



FIGURA II-3

**Diagrama de determinación para cristales biáxicos positivos ($\gamma - \alpha$) desde 0,001 a 0,019. Consúltese la tabla II-3 para identificar los números de código usados en el diagrama.**

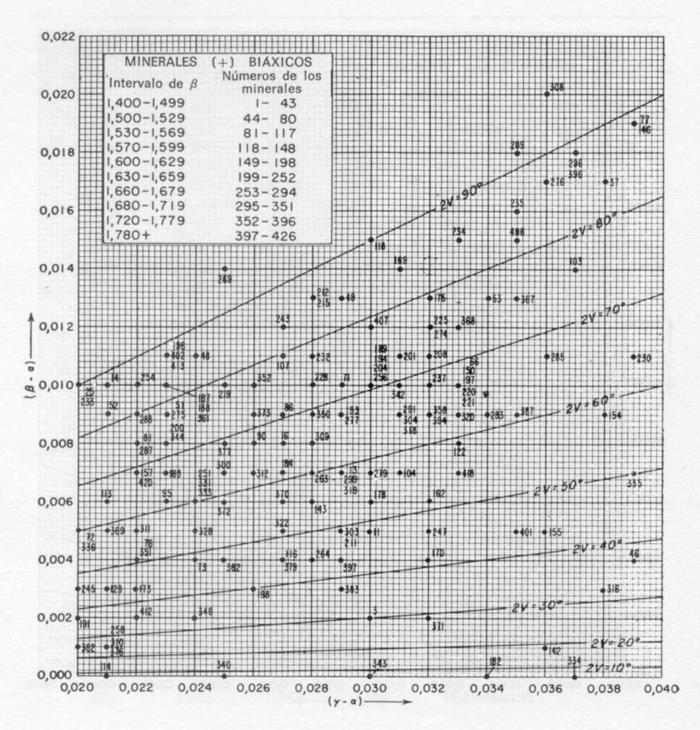



FIGURA II-4

**Diagrama para la determinación de los cristales biáxicos positivos (γ — α) desde 0,020 a 0,039. Consúltese la tabla II-3 para la identificación de los números de código usados en el diagrama.**

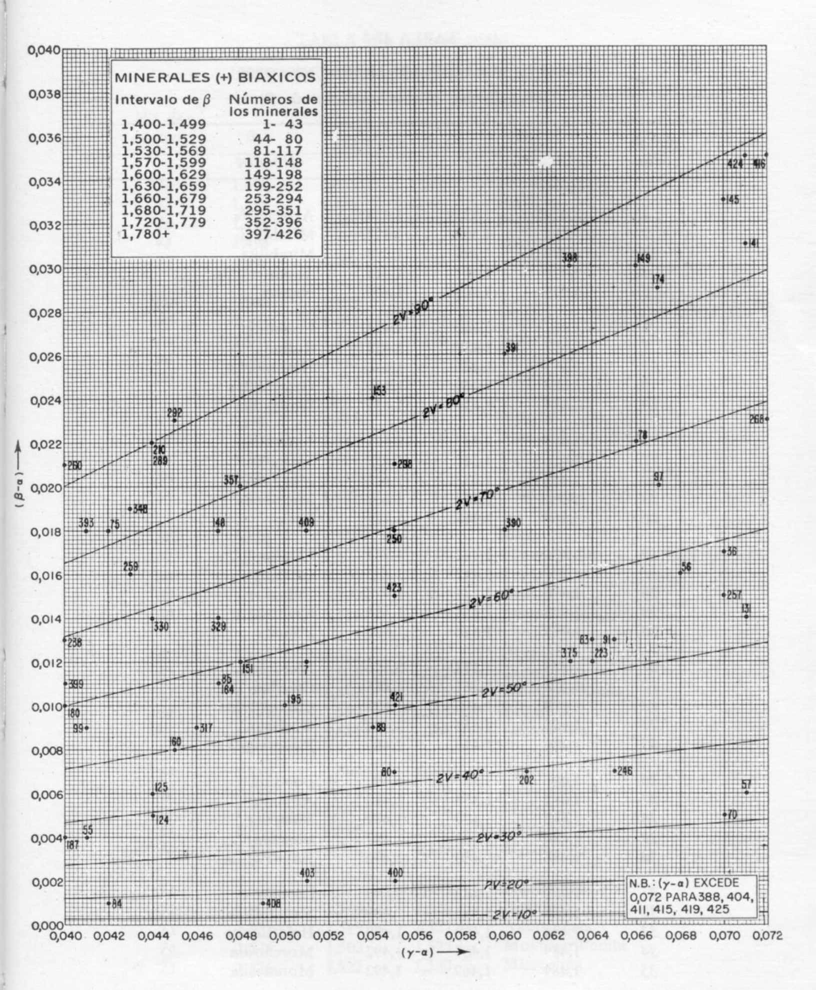



FIGURA II-5

**Diagrama para la determinación de los cristales biáxicos positivos ($\gamma - \alpha$) desde 0,040 a 0,072. Consúltese la tabla II-3 para la identificación de los números de código usados en el diagrama.**

TABLA II-4

LISTA DE LOS MINERALES BIÁXICOS NEGATIVOS

(colocados por valores crecientes de $\beta$)

| *N.º de código* | $\beta$ | $\alpha$ | $\gamma$ | *Nombre* |
|---|---|---|---|---|
| *1* | 1,3245 | 1,3239 | 1,3247 | Avogadrita |
| *2* | 1,395 | 1,393 | 1,397 | Mirabilita |
| *3* | 1,396 | 1,394 | 1,398 | Mirabilita |
| *4* | 1,414 | 1,407 | 1,415 | Thomsenolita |
| *5* | 1,425 | 1,405 | 1,440 | Natrón |
| *6* | 1,452 | 1,440 | 1,453 | Leçontita |
| *7* | 1,452 | 1,430 | 1,458 | Kalinita |
| *8* | 1,453 | 1,426 | 1,456 | Hexahidrita |
| *9* | 1,454 | 1,448 | 1,456 | Gearksutita |
| *10* | 1,455 | 1,435 | 1,459 | Wattevilita |
| *11* | 1,455 | 1,433 | 1,461 | Epsomita |
| *12* | 1,456 | 1,340 | 1,459 | Sassolita |
| *13* | 1,457 | 1,432 | 1,458 | Mendocita |
| *14* | 1,461 | 1,449 | 1,463 | Mendocita |
| *15* | 1,469 | 1,447 | 1,472 | Bórax |
| *16* | 1,470 | 1,462 | 1,471 | Paraluminita |
| *17* | 1,470 | 1,447 | 1,473 | Goslarita |
| *18* | 1,470 | 1,447 | 1,472 | Bórax |
| *19* | 1,472 | 1,454 | 1,488 | Kernita |
| *20* | 1,475 | 1,474 | 1,476 | Ptilolita |
| *21* | 1,475 | 1,472 | 1,476 | Mordenita |
| *22* | 1,478 | 1,461 | 1,485 | Creedita |
| *23* | 1,479 | 1,476 | 1,479 | Clinoptilolita |
| *24* | 1,480 | 1,457 | 1,484 | Goslarita |
| *25* | 1,480 | 1,476 | 1,483 | Pickeringita |
| *26* | 1,48 | 1,47 | 1,49 | Boothita |
| *27* | 1,482 | 1,478 | 1,482 | Apjonita |
| *28* | 1,483 | 1,477 | 1,489 | Bieberita |
| *29* | 1,486 | 1,483 | 1,487 | Bloedita |
| *30* | 1,486 | 1,480 | 1,490 | Halotriquita |
| *31* | 1,487 | 1,483 | 1,490 | Leonita |
| *32* | 1,488 | 1,485 | 1,489 | Vanthoffita |
| *33* | 1,488 | 1,480 | 1,490 | Halotriquita |
| *34* | 1,489 | 1,467 | 1,492 | Morenosita |
| *35* | 1,489 | 1,469 | 1,492 | Morenosita |
| *36* | 1,491 | 1,482 | 1,493 | Estilbita |
| *37* | 1,492 | 1,484 | 1,495 | Estilbita, estellerita |
| *38* | 1,492 | 1,412 | 1,540 | Trona |
| *39* | 1,494 | 1,465 | 1,495 | Bianquita |
| *40* | 1,497 | 1,493 | 1,500 | Filipsita |

TABLA II-4 *(continuación)*

LISTA DE LOS MINERALES BIÁXICOS NEGATIVOS

| *N.º de código* | *β* | *α* | *γ* | *Nombre* |
|---|---|---|---|---|
| *41* | 1,498 | 1,465 | 1,504 | Nitrocalcita |
| *42* | 1,498 | 1,489 | 1,499 | Estilbita |
| *43* | 1,498 | 1,487 | 1,500 | Estilbita |
| *44* | 1,498 | 1,494 | 1,500 | Estilbita |
| *45* | 1,499 | 1,492 | 1,501 | Estilbita |
| *46* | 1,500 | 1,490 | 1,502 | Estilbita |
| *47* | 1,501 | 1,493 | 1,507 | Estilbita, epidesmina |
| *48* | 1,501 | 1,493 | 1,508 | Didimolita |
| *49* | 1,502 | 1,490 | 1,511 | Antigorita |
| *50* | 1,505 | 1,494 | 1,516 | Kaınita |
| *51* | 1,505 | 1,492 | 1,516 | Inyoita |
| *52* | 1,506 | 1,498 | 1,508 | Parasepiolita, Mn |
| *53* | 1,508 | 1,495 | 1,514 | Calcantita |
| *54* | 1,51 | 1,495 | 1,520 | Inyoita |
| *55* | 1,510 | 1,502 | 1,512 | Epistilbita |
| *56* | 1,510 | 1,479 | 1,511 | Saponita |
| *57* | 1,510 | 1,49 | 1,521 | Uranospatita |
| *58* | 1,512 | 1,506 | 1,517 | Leonhardita |
| *59* | 1,514 | 1,509 | 1,514 | Carnegieita |
| *60* | 1,514 | 1,504 | 1,516 | Laumontita |
| *61* | 1,514 | 1,512 | 1,515 | Okenita |
| *62* | 1,515 | 1,505 | 1,517 | Laumontita |
| *63* | 1,516 | 1,493 | 1,516 | Montmorillonita |
| *64* | 1,517 | 1,500 | 1,518 | Singenita |
| *65* | 1,518 | 1,511 | 1,522 | Laumontita |
| *66* | 1,718 | 1,508 | 1,522 | Ilesita |
| *67* | 1,519 | 1,512 | 1,519 | Escolecita |
| *68* | 1,526(?) | 1,519 | 1,529 | Sepiolita |
| *69* | 1,52 | 1,516 | 1,520 | Carnegieita |
| *70* | 1,522 | 1,518 | 1,525 | Microclina |
| *71* | 1,524 | 1,513 | 1,525 | Laumontita |
| *72* | 1,524 | 1,518 | 1,526 | Ortoclasa |
| *73* | 1,525 | 1,519 | 1,527 | Anortoclasa |
| *74* | 1,526 | 1,503 | 1,527 | Montmorillonita |
| *75* | 1,526 | 1,522 | 1,530 | Microclina |
| *76* | 1,527 | 1,490 | 1,527 | Saponita |
| *77* | 1,528 | 1,523 | 1,529 | Analbita (?) |
| *78* | 1,530 | 1,518 | 1,542 | Minasragrita |
| *79* | 1,531 | 1,528 | 1,534 | Hialofana |
| *80* | 1,531 | 1,525 | 1,535 | Searlesita |

## TABLA II-4 *(continuación)*

### Lista de los minerales biáxicos negativos

| *N.º de código* | *β* | *α* | *γ* | *Nombre* |
|---|---|---|---|---|
| *81* | 1,533 | 1,513 | 1,535 | Searlesita |
| *82* | 1,534 | 1,489 | 1,557 | Artinita |
| *83* | 1,534 | 1,514 | 1,541 | Calcantita, Zn - Cu |
| *84* | 1,535 | 1,500 | 1,560 | Meyerhofferita |
| *85* | 1,535 | 1,515 | 1,536 | Glauberita |
| *86* | 1,535 | 1,530 | 1,540 | Okenita |
| *87* | 1,535 | 1,494 | 1,536 | Beidellita |
| *88* | 1,536 | 1,517 | 1,543 | Calcantita, Fe - Cu |
| *89* | 1,537 | 1,495 | 1,537 | Beidellita |
| *90* | 1,537 | 1,528 | 1,543 | Siderotilo |
| *91* | 1,537 | 1,514 | 1,543 | Calcantita |
| *92* | 1,538 | 1,534 | 1,540 | Hialofana |
| *93* | 1,538 | 1,534 | 1,540 | Cordierita |
| *94* | 1,540 | 1,527 | 1,544 | Sulfoborita |
| *95* | 1,540 | 1,531 | 1,548 | Gismondita |
| *96* | 1,541 | 1,520 | 1,545 | Lueneburgita |
| *97* | 1,543 | 1,538 | 1,545 | Cordierita |
| *98* | 1,543 | 1,539 | 1,547 | Oligoclasa ($Ab_4An$) |
| *99* | 1,545 | 1,503 | 1,545 | Folidolita |
| *100* | 1,545 | 1,542 | 1,547 | Hilofana |
| *101* | 1,545 | 1,525 | 1,545 | Vermiculita |
| *102* | 1,545 | 1,533 | 1,547 | Mooreita |
| *103* | 1,546 | 1,539 | 1,551 | Brushita |
| *104* | 1,546 | 1,542 | 1,549 | Oligoclasa |
| *105* | 1,547 | 1,520 | 1,572 | Copiapita |
| *106* | 1,547 | 1,540 | 1,550 | Cordierita |
| *107* | 1,548 | 1,535 | 1,549 | Centrallasita |
| *108* | 1,549 | 1,528 | 1,549 | Truscottita |
| *109* | 1,549 | 1,531 | 1,552 | Calcantita, Co |
| *110* | 1,549 | 1,517 | 1,549 | Montmorillonita |
| *111* | 1,549 | 1,538 | 1,554 | Edingtonita |
| *112* | 1,551 | 1,547 | 1,554 | Andeclasa |
| *113* | 1,553 | 1,530 | 1,556 | Lepidolita |
| *114* | 1,554 | 1,535 | 1,555 | Lepidolita |
| *115* | 1,554 | 1,545 | 1,565 | Lacroixita |
| *116* | 1,555 | 1,532 | 1,555 | Lepidolita |
| *117* | 1,556 | 1,552 | 1,559 | Milosquita |
| *118* | 1,555 | 1,543 | 1,558 | Lepidolita, polilitionita |
| *119* | 1,558 | 1,552 | 1,561 | Berilonita |
| *120* | 1,558 | 1,520 | 1,558 | Flogopita |

TABLA II-4 *(continuación)*

LISTA DE LOS MINERALES BIÁXICOS NEGATIVOS

| *N.º de código* | *β* | *α* | *γ* | *Nombre* |
|---|---|---|---|---|
| *121* | 1,560 | 1,547 | 1,567 | Polialita |
| *122* | 1,560 | 1,54 | 1,560 | Vermiculita |
| *123* | 1,560 | 1,54 | 1,560 | Jefferisita |
| *124* | 1,561 | 1,551 | 1,562 | Jezekita |
| *125* | 1,562 | 1,551 | 1,563 | Morinita |
| *126* | 1,562 | 1,552 | 1,563 | Cordierita |
| *127* | 1,562 | 1,557 | 1,563 | Nacrita |
| *128* | 1,563 | 1,560 | 1,566 | Nacrita |
| *129* | 1,564 | 1,559 | 1,565 | Anauxita |
| *130* | 1,564 | 1,535 | 1,565 | Flogopita |
| *131* | 1,565 | 1,543 | 1,565 | Arcilla potásica |
| *132* | 1,565 | 1,544 | 1,566 | Lepidolita, polilitionita |
| *133* | 1,565 | 1,550 | 1,570 | Variscita |
| *134* | 1,565 | 1,561 | 1,566 | Kaolinita |
| *135* | 1,570 | 1,560 | 1,571 | Antigorita |
| *136* | 1,570 | 1,565 | 1,574 | Bitownita ($AbAn_3$) |
| *137* | 1,570 | 1,523 | 1,572 | Beidellita |
| *138* | 1,571 | 1,524 | 1,583 | Romerita |
| *139* | 1,571 | 1,554 | 1,576 | Variscita |
| *140* | 1,572 | 1,555 | 1,575 | Hannayita |
| *141* | 1,572 | 1,566 | 1,576 | Bitownita ($AbAn_4$) |
| *142* | 1,572 | 1,570 | 1,572 | Englisita |
| *143* | 1,573 | 1,542 | 1,573 | Vermiculita |
| *144* | 1,574 | 1,540 | 1,574 | Flogopita |
| *145* | 1,574 | 1,56 | 1,580 | Bassetita |
| *146* | 1,574 | 1,568 | 1,578 | Bitownortita ($Ab_3An_{17}$) |
| *147* | 1,575 | 1,553 | 1,577 | Autunita |
| *148* | 1,576 | 1,546 | 1,576 | Stilpnomelana |
| *149* | 1,576 | 1,562 | 1,588 | Esfaerita |
| *150* | 1,577 | 1,565 | 1,578 | Eastonita |
| *151* | 1,578 | 1,576 | 1,579 | Pennitita |
| *152* | 1,678 | 1,551 | 1,581 | Zinwaldita |
| *153* | 1,578 | 1,544 | 1,601 | Kroehnkita |
| *154* | 1,58 | 1,55 | 1,58 | Zinwaldita |
| *155* | 1,580 | 1,562 | 1,582 | Canbiita |
| *156* | 1,580 | 1,573 | 1,585 | Anortita ($AbAn_{19}$) |
| *157* | 1,581 | 1,561 | 1,581 | Vermiculita |
| *158* | 1,581 | 1,551 | 1,587 | Moscovita |
| *159* | 1,581 | 1,559 | 1,586 | Glauconita |
| *160* | 1,582 | 1,570 | 1,587 | Celsiana |

TABLA II-4 *(continuación)*

LISTA DE LOS MINERALES BIÁXICOS NEGATIVOS

| *N.º de código* | $\beta$ | $\alpha$ | $\gamma$ | *Nombre* |
|---|---|---|---|---|
| *161* | 1,582 | 1,560 | 1,587 | Uranospinita |
| *162* | 1,582 | 1,574 | 1,582 | Beta hopeita |
| *163* | 1,582 | 1,552 | 1,588 | Moscovita |
| *164* | 1,583 | 1,562 | 1,590 | Variscita |
| *165* | 1,584 | 1,566 | 1,593 | Variscita |
| *166* | 1,584 | 1,576 | 1,588 | Anortita |
| *167* | 1,584 | 1,579 | 1,585 | Delta mooreita |
| *168* | 1,585 | 1,56 | 1,585 | Nontronita |
| *169* | 1,588 | 1,552 | 1,600 | Pirofilita |
| *170* | 1,588 | 1,559 | 1,588 | Montmorillonita |
| *171* | 1,589 | 1,539 | 1,589 | Talco |
| *172* | 1,589 | 1,583 | 1,594 | Farmacolita |
| *173* | 1,590 | 1,578 | 1,599 | Variscita |
| *174* | 1,590 | 1,575 | 1,605 | Catapleita |
| *175* | 1,591 | 1,572 | 1,59 | Alfa hopeita |
| *176* | 1,591 | 1,572 | 1,594 | Priceita |
| *177* | 1,592 | 1,582 | 1,592 | Torbernita |
| *178* | 1,593 | 1,585 | 1,608 | Nontronita |
| *179* | 1,594 | 1,55 | 1,594 | Alurgita |
| *180* | 1,594 | 1,570 | 1,597 | Astrolita |
| *181* | 1,594 | 1,584 | 1,594 | Clinocloro |
| *182* | 1,594 | 1,551 | 1,594 | Estilpnomelana |
| *183* | 1,595 | 1,578 | 1,598 | Ambligonita |
| *184* | 1,595 | 1,572 | 1,614 | Johannita |
| *185* | 1,595 | 1,555 | 1,595 | Diabantita |
| *186* | 1,595 | 1,558 | 1,601 | Moscovita |
| *187* | 1,595 | 1,575 | 1,610 | Variscita |
| *188* | 1,595 | 1,571 | 1,598 | Leucofanita |
| *189* | 1,596 | 1,551 | 1,596 | Fluorbiotita |
| *190* | 1,597 | 1,592 | 1,599 | Cordierita |
| *191* | 1,597 | 1,575 | 1,598 | Criscola |
| *192* | 1,598 | 1,568 | 1,598 | Manganofilita |
| *193* | 1,598 | 1,584 | 1,602 | Millisita |
| *194* | 1,598 | 1,586 | 1,605 | Howlita |
| *195* | 1,599 | 1,561 | 1,599 | Estilpnomelana |
| *196* | 1,599 | 1,556 | 1,602 | Moscovita |
| *197* | 1,599 | 1,564 | 1,600 | Paragonita |
| *198* | 1,600 | 1,589 | 1,610 | Nontronita |
| *199* | 1,602 | 1,586 | 1,606 | Espencerita |
| *200* | 1,603 | 1,597 | 1,605 | Foshagita |

TABLA II-4 *(continuación)*

LISTA DE LOS MINERALES BIÁXICOS NEGATIVOS

| *N.º de código* | *β* | *α* | *γ* | *Nombre* |
|---|---|---|---|---|
| *201* | 1,603 | 1,573 | 1,604 | Ganofilita |
| *202* | 1,605 | 1,591 | 1,614 | Bertrandita |
| *203* | 1,605 | 1,577 | 1,609 | Paragonita |
| *204* | 1,606 | 1,592 | 1,617 | Condrodita |
| *205* | 1,606 | 1,562 | 1,606 | Flogopita |
| *206* | 1,607 | 1,594 | 1,619 | Condrodita |
| *207* | 1,61 | 1,605 | 1,612 | Hillebrandita |
| *208* | 1,61 | 1,57 | 1,61 | Protolitionita |
| *209* | 1,611 | 1,572 | 1,615 | Moscovita |
| *210* | 1,611 | 1,600 | 1,620 | Montebrasita |
| *211* | 1,612 | 1,592 | 1,621 | Herderita |
| *212* | 1,613 | 1,593 | 1,613 | Melifanita |
| *213* | 1,613 | 1,599 | 1,625 | Tremolita |
| *214* | 1,614 | 1,594 | 1,616 | Fosfofilita |
| *215* | 1,614 | 1,590 | 1,615 | Glauconita |
| *216* | 1,615 | 1,605 | 1,622 | Tremolita sódica (richterita) |
| *217* | 1,616 | 1,606 | 1,623 | Tremolita sódica |
| *218* | 1,616 | 1,597 | 1,624 | Sanbornita |
| *219* | 1,616 | 1,600 | 1,627 | Tremolita |
| *220* | 1,616 | 1,602 | 1,629 | Lehiita |
| *221* | 1,618 | 1,597 | 1,619 | Glauconita |
| *222* | 1,619 | 1,605 | 1,619 | Delesita |
| *223* | 1,620 | 1,573 | 1,620 | Biotita |
| *224* | 1,622 | 1,609 | 1,622 | Glauconita |
| *225* | 1,623 | 1,565 | 1,623 | Stilpnomelana |
| *226* | 1,623 | 1,610 | 1,623 | Uranocircita |
| *227* | 1,623 | 1,614 | 1,624 | Dehrmita |
| *228* | 1,625 | 1,595 | 1,627 | Margarita sódica, efesita |
| *229* | 1,625 | 1,592 | 1,625 | Protolitionita |
| *230* | 1,628 | 1,611 | 1,630 | Carfolita |
| *231* | 1,628 | 1,598 | 1,654 | Lausenita |
| *232* | 1,628 | 1,609 | 1,628 | Glauconita |
| *233* | 1,629 | 1,615 | 1,637 | Richterita |
| *234* | 1,629 | 1,620 | 1,630 | Margarita |
| *235* | 1,63± | 1,60 | 1,63 | Mariposita |
| *236* | 1,630 | 1,585 | 1,630 | Troegerita |
| *237* | 1,63 | 1,580 | 1,630 | Biotita |
| *238* | 1,63 | 1,59 | 1,64 | Roscoelita |
| *239* | 1,63 | 1,608 | 1,638 | Celadonita |
| *240* | 1,630 | 1,603 | 1,630 | Glauconita |

TABLA II-4 *(continuación)*

LISTA DE LOS MINERALES BIÁXICOS NEGATIVOS

| *N.º de código* | $\beta$ | $\alpha$ | $\gamma$ | *Nombre* |
|---|---|---|---|---|
| *241* | 1,630 | 1,614 | 1,641 | Actinolita |
| *242* | 1,630 | 1,619 | 1,640 | Anthofilita |
| *243* | 1,630 | 1,622 | 1,630 | Podolita |
| *244* | 1,631 | 1,618 | 1,642 | Hastingsita |
| *245* | 1,632 | 1,622 | 1,641 | Pargasita |
| *246* | 1,632 | 1,602 | 1,632 | Bementita |
| *247* | 1,632 | 1,615 | 1,634 | Glaucofana |
| *248* | 1,632 | 1,620 | 1,634 | Wollastonita |
| *249* | 1,633 | 1,618 | 1,641 | Actinolita |
| *250* | 1,633 | 1,630 | 1,636 | Danburita |
| *251* | 1,633 | 1,629 | 1,639 | Andalucita |
| *252* | 1,634 | 1,612 | 1,643 | Lazulita |
| *253* | 1,635 | 1,622 | 1,641 | Richterita |
| *254* | 1,635 | 1,629 | 1,640 | Anthofilita |
| *255* | 1,636 | 1,622 | 1,636 | Manganofilita |
| *256* | 1,636 | 1,602 | 1,639 | Grandidierita |
| *257* | 1,636 | 1,609 | 1,644 | Inesita |
| *258* | 1,636 | 1,623 | 1,644 | Gedrita |
| *259* | 1,637 | 1,615 | 1,638 | Clorita |
| *260* | 1,638 | 1,621 | 1,638 | Glaucofana |
| *261* | 1,639 | 1,634 | 1,643 | Andalucita |
| *262* | 1,639 | 1,634 | 1,645 | Andalucita |
| *263* | 1,639 | 1,624 | 1,643 | Rosquerita |
| *264* | 1,639 | 1,633 | 1,642 | Arfvedsonita |
| *265* | 1,641 | 1,637 | 1,646 | Andalucita |
| *266* | 1,642 | 1,584 | 1,647 | Serpierita |
| *267* | 1,642 | 1,611 | 1,657 | Sklodowskita |
| *268* | 1,643 | 1,632 | 1,645 | Margarita |
| *269* | 1,643 | 1,612 | 1,644 | Glauconita |
| *270* | 1,644 | 1,636 | 1,649 | Eckermannita |
| *271* | 1,645 | 1,625 | 1,654 | Holmquistita |
| *272* | 1,645 | 1,638 | 1,651 | Boehmita |
| *273* | 1,646 | 1,639 | 1,653 | Monticellita |
| *274* | 1,646 | 1,630 | 1,649 | Gastaldita |
| *275* | 1,647 | 1,634 | 1,652 | Hornblenda |
| *276* | 1,647 | 1,624 | 1,647 | Bementita |
| *277* | 1,648 | 1,584 | 1,648 | Biotita |
| *278* | 1,649 | 1,643 | 1,649 | Dafnita |
| *279* | 1,650 | 1,637 | 1,660 | Tremolita manganésica |
| *280* | 1,650 | 1,640 | 1,653 | Wollastonita |

TABLA II-4 *(continuación)*

LISTA DE LOS MINERALES BIÁXICOS NEGATIVOS

| *N.º de código* | β | α | γ | *Nombre* |
|---|---|---|---|---|
| *281* | 1,650 | 1,623 | 1,651 | Friedelita |
| *282* | 1,65 | 1,625 | 1,655 | Nontronita |
| *283* | 1,65 | 1,64 | 1,66 | Crocidolita |
| *284* | 1,650 | 1,610 | 1,682 | Epistolita |
| *285* | 1,650 | 1,608 | 1,655 | Iddingsita |
| *286* | 1,651 | 1,648 | 1,651 | Afrosiderita |
| *287* | 1,652 | 1,643 | 1,654 | Bitiita |
| *288* | 1,652 | 1,612 | 1,675 | Liroconita |
| *289* | 1,654 | 1,626 | 1,670 | Datolita |
| *290* | 1,654 | 1,62 | 1,689 | Cabrerita |
| *291* | 1,654 | 1,647 | 1,660 | Hureaulita |
| *292* | 1,655 | 1,633 | 1,662 | Eosforita |
| *293* | 1,655 | 1,646 | 1,657 | Wentzelita |
| *294* | 1,655 | 1,642 | 1,661 | Antofilita |
| *295* | 1,656 | 1,652 | 1,660 | Palaita |
| *296* | 1,657 | 1,652 | 1,662 | Baldaufita |
| *297* | 1,657 | 1,644 | 1,663 | Pargasita |
| *298* | 1,657 | 1,646 | 1,658 | Seibertita |
| *299* | 1,658 | 1,622 | 1,687 | Annabergita |
| *300* | 1,660 | 1,648 | 1,660 | Brandisita |
| *301* | 1,660 | 1,640 | 1,675 | Tilasita |
| *302* | 1,660 | 1,649 | 1,661 | Xantofilita |
| *303* | 1,66 | 1,63 | 1,69 | Estewartita |
| *304* | 1,660 | 1,638 | 1,667 | Eosforita |
| *305* | 1,660 | 1,650 | 1,660 | Clorita |
| *306* | 1,661 | 1,653 | 1,669 | Hastingsita |
| *307* | 1,662 | 1,651 | 1,668 | Monticelita |
| *308* | 1,663 | 1,637 | 1,673 | Lazulita |
| *309* | 1,663 | 1,640 | 1,665 | Seamanita |
| *310* | 1,664 | 1,516 | 1,666 | Estroncianita |
| *311* | 1,664 | 1,655 | 1,668 | Ternovskita |
| *312* | 1,665 | 1,650 | 1,679 | Cummingtonita |
| *313* | 1,665 | 1,653 | 1,665 | Turingita |
| *314* | 1,665 | 1,650 | 1,675 | Hornblenda |
| *315* | 1,666 | 1,654 | 1,670 | Hornblenda |
| *316* | 1,667 | 1,662 | 1,669 | Clinohedrita |
| *317* | 1,667 | 1,642 | 1,669 | Uranofana |
| *318* | 1,667 | 1,658 | 1,667 | Proclorita |
| *319* | 1,668 | 1,635 | 1,702 | Simplesita |
| *320* | 1,669 | 1,658 | 1,670 | Zinkosita |

TABLA II-4 *(continuación)*

Lista de los minerales biáxicos negativos

| *N.º de código* | β | α | γ | *Nombre* |
|---|---|---|---|---|
| *321* | 1,670 | 1,618 | 1,670 | Siderofilita |
| *322* | 1,67 | 1,65 | 1,67 | Estrigovita |
| *323* | 1,671 | 1,662 | 1,691 | Andalucita |
| *324* | 1,672 | 1,664 | 1,680 | Hastingsita |
| *325* | 1,673 | 1,634 | 1,685 | Durangita |
| *326* | 1,673 | 1,662 | 1,684 | Triplita |
| *327* | 1,673 | 1,659 | 1,681 | Hornblenda verde |
| *328* | 1,674 | 1,640 | 1,679 | Espurrita |
| *329* | 1,674 | 1,662 | 1,676 | Bustamita |
| *330* | 1,674 | 1,657 | 1,685 | Cummingtonita |
| *331* | 1,675 | 1,664 | 1,679 | Bustamita |
| *332* | 1,676 | 1,529 | 1,677 | Witherita |
| *333* | 1,676 | 1,665 | 1,677 | Kornerupina |
| *334* | 1,676 | 1,623 | 1,677 | Biotita |
| *335* | 1,677 | 1,663 | 1,685 | Soretita |
| *336* | 1,678 | 1,643 | 1,684 | Childrenita |
| *337* | 1,680 | 1,670 | 1,682 | Arfvedsonita |
| *338* | 1,681 | 1,530 | 1,685 | Aragonito |
| *339* | 1,682 | 1,610 | 1,692 | Roscoelita |
| *340* | 1,683 | 1,670 | 1,693 | Hornblenda basáltica |
| *341* | 1,684 | 1,676 | 1,689 | Axinita |
| *342* | 1,684 | 1,663 | 1,699 | Grünerita |
| *343* | 1,684 | 1,659 | 1,686 | Dumortierita |
| *344* | 1,685 | 1,678 | 1,688 | Axinita |
| *345* | 1,685 | 1,675 | 1,690 | Dumortierita |
| *346* | 1,685 | 1,672 | 1,687 | Bustamita |
| *347* | 1,685 | 1,595 | 1,685 | Estilpnomelana |
| *348* | 1,685 | 1,658 | 1,690 | Escroeckingerita |
| *349* | 1,685 | 1,670 | 1,685 | Turingita |
| *350* | 1,686 | 1,67 | 1,698 | Tricalcita |
| *351* | 1,686 | 1,678 | 1,689 | Dumortierita |
| *352* | 1,687 | 1,668 | 1,688 | Dumortierita |
| *353* | 1,689 | 1,682 | 1,694 | Hiperstena |
| *354* | 1,689 | 1,664 | 1,692 | Cenosita |
| *355* | 1,690 | 1,675 | 1,693 | Sincosita |
| *356* | 1,690 | 1,682 | 1,697 | Clorofenicita |
| *357* | 1,690 | 1,630 | 1,690 | Annita |
| *358* | 1,691 | 1,670 | 1,692 | Dumortierita |
| *359* | 1,691 | 1,675 | 1,701 | Hornblenda |
| *360* | 1,692 | 1,674 | 1,712 | Crisolita |

TABLA II-4 *(continuación)*

LISTA DE LOS MINERALES BIÁXICOS NEGATIVOS

| *N.º de código* | $\beta$ | $\alpha$ | $\gamma$ | *Nombre* |
|---|---|---|---|---|
| *361* | 1,692 | 1,684 | 1,696 | Axinita |
| *362* | 1,692 | 1,597 | 1,692 | Estilpnomelana |
| *363* | 1,693 | 1,676 | 1,707 | Grünerita |
| *364* | 1,694 | 1,676 | 1,708 | Kersutita |
| *365* | 1,694 | 1,679 | 1,698 | Hastingsita |
| *366* | 1,695 | 1,542 | 1,699 | Aragonito |
| *367* | 1,695 | 1,675 | 1,714 | Forsterita |
| *368* | 1,695 | 1,680 | 1,698 | Tschermakita |
| *369* | 1,695 | 1,691 | 1,696 | Trifilita |
| *370* | 1,695 | 1,684 | 1,698 | Kempita |
| *371* | 1,697 | 1,672 | 1,717 | Grünerita |
| *372* | 1,698 | 1,680 | 1,700 | Hornblenda |
| *373* | 1,698 | 1,650 | 1,711 | Oxihornblenda |
| *374* | 1,700 | 1,696 | 1,702 | Trifilita |
| *375* | 1,700 | 1,685 | 1,703 | Willemita |
| *376* | 1,701 | 1,687 | 1,703 | Bustamita |
| *377* | 1,701 | 1,680 | 1,720 | Olivino |
| *378* | 1,701 | 1,695 | 1,703 | Trifilita |
| *379* | 1,701 | 1,693 | 1,704 | Tinzenita |
| *380* | 1,702 | 1,692 | 1,705 | Hiperstena |
| *381* | 1,702 | 1,695 | 1,708 | Barilita |
| *382* | 1,705 | 1,660 | 1,713 | Tarbuttita |
| *383* | 1,705 | 1,692 | 1,707 | Bustamita |
| *384* | 1,706 | 1,681 | 1,718 | Olivino |
| *385* | 1,707 | 1,687 | 1,708 | Barkevikita |
| *386* | 1,707 | 1,704 | 1,710 | Zafiro |
| *387* | 1,709 | 1,686 | 1,729 | Grünerita |
| *388* | 1,710 | 1,695 | 1,710 | Hastingsita |
| *389* | 1,713 | 1,703 | 1,722 | Gerhardtita |
| *390* | 1,714 | 1,697 | 1,722 | Estrengita |
| *391* | 1,714 | 1,690 | 1,735 | Escoepita |
| *392* | 1,715 | 1,675 | 1,735 | Oxihornblenda |
| *393* | 1,715 | 1,674 | 1,718 | Iddingsita |
| *394* | 1,716 | 1,679 | 1,729 | Glaucocroita |
| *395* | 1,716 | 1,700 | 1,726 | Woehlerita |
| *396* | 1,719 | 1,716 | 1,723 | Epidota |
| *397* | 1,719 | 1,698 | 1,722 | Ferrohastingsita |
| *398* | 1,719 | 1,699 | 1,721 | Hastingsita |
| *399* | 1,719 | 1,715 | 1,720 | Vesubianita |
| *400* | 1,720 | 1,715 | 1,725 | Trimerita |

TABLA II-4 *(continuación)*

LISTA DE LOS MINERALES BIÁXICOS NEGATIVOS

| *N.º de código* | β | α | γ | *Nombre* |
|---|---|---|---|---|
| *401* | 1,720 | 1,712 | 1,728 | Cianita |
| *402* | 1,720 | 1,691 | 1,720 | Fosfuranilita |
| *403* | 1,722 | 1,687 | 1,731 | Tarapacaita |
| *404* | 1,722 | 1,717 | 1,729 | Cianita |
| *405* | 1,722 | 1,713 | 1,729 | Cianita |
| *406* | 1,723 | 1,698 | 1,745 | Lavenita |
| *407* | 1,725 | 1,692 | 1,738 | Fosfosiderita |
| *408* | 1,725 | 1,680 | 1,752 | Hornblenda basáltica |
| *409* | 1,726 | 1,694 | 1,730 | Tirolita |
| *410* | 1,727 | 1,711 | 1,740 | Picrotefroita |
| *411* | 1,728 | 1,715 | 1,731 | Hiperstena |
| *412* | 1,728 | 1,675 | 1,730 | Sarcopsido |
| *413* | 1,728 | 1,720 | 1,735 | Landesita |
| *414* | 1,730 | 1,692 | 1,760 | Kersutita |
| *415* | 1,731 | 1,710 | 1,732 | Calcomenita |
| *416* | 1,733 | 1,724 | 1,739 | Hidrocianita |
| *417* | 1,734 | 1,723 | 1,736 | Gageita |
| *418* | 1,734 | 1,696 | 1,743 | Monticellita |
| *419* | 1,735 | 1,625 | 1,735 | Estilpnomelana |
| *420* | 1,735 | 1,715 | 1,745 | Sicklerita |
| *421* | 1,735 | 1,712 | 1,753 | Hialosiderita |
| *422* | 1,736 | 1,715 | 1,739 | Renardita |
| *423* | 1,738 | 1,731 | 1,744 | Thalenita |
| *424* | 1,739 | 1,727 | 1,751 | Allanita, alterada |
| *425* | 1,740 | 1,733 | 1,744 | Rodonita |
| *426* | 1,742 | 1,722 | 1,750 | Epidota |
| *427* | 1,742 | 1,724 | 1,746 | Hodgkinsonita |
| *428* | 1,744 | 1,708 | 1,773 | Adamita |
| *429* | 1,745 | 1,723 | 1,765 | Iddingsita |
| *430* | 1,749 | 1,724 | 1,749 | Alodelfita |
| *431* | 1,752 | 1,738 | 1,755 | Sobralita |
| *432* | 1,754 | 1,743 | 1,764 | Caracolita |
| *433* | 1,755 | 1,736 | 1,766 | Sursassita |
| *434* | 1,757 | 1,738 | 1,778 | Piedmontita |
| *435* | 1,760 | 1,750 | 1,765 | Nagatelita |
| *436* | 1,761 | 1,738 | 1,782 | Manganepidota |
| *437* | 1,762 | 1,742 | 1,776 | Gummita |
| *438* | 1,763 | 1,729 | 1,780 | Epïdota |
| *439* | 1,768 | 1,744 | 1,788 | Diopsido - acmita |
| *440* | 1,768 | 1,760 | 1,768 | Corindón |
| *441* | 1,768 | 1,742 | 1,787 | Egirita |
| *442* | 1,769 | 1,702 | 1,796 | Oxihornblenda |

TABLA II-4 *(continuación)*

LISTA DE LOS MINERALES BIÁXICOS NEGATIVOS

| *N.º de código* | $\beta$ | $\alpha$ | $\gamma$ | *Nombre* |
|---|---|---|---|---|
| *443* | 1,769 | 1,760 | 1,769 | Larsenita cálcica |
| *444* | 1,770 | 1,745 | 1,782 | Egirita vanadífera |
| *445* | 1,771 | 1,751 | 1,782 | Leucofenicita |
| *446* | 1,771 | 1,728 | 1,800 | Brocantita |
| *447* | 1,775 | 1,772 | 1,777 | Britolita |
| *448* | 1,778 | 1,748 | 1,792 | Hortonolita |
| *449* | 1,779 | 1,760 | 1,779 | Alactita |
| *450* | 1,780 | 1,763 | 1,812 | Diopsido - acmita |
| *451* | 1,780 | 1,756 | 1,792 | Alleganita |
| *452* | 1,782 | 1,758 | 1,804 | Roepperita |
| *453* | 1,786 | 1,759 | 1,797 | Tefroita |
| *454* | 1,792 | 1,768 | 1,803 | Hortonolita |
| *455* | 1,793 | 1,756 | 1,809 | Thortveitita |
| *456* | 1,799 | 1,762 | 1,814 | Acmita (32 % $Fe_2O_3$) |
| *457* | 1,804 | 1,778 | 1,815 | Tefroita |
| *458* | 1,805 | 1,78 | 1,82 | Tefroita |
| *459* | 1,807 | 1,769 | 1,822 | Acmita |
| *460* | 1,807 | 1,793 | 1,809 | Sarkinita |
| *461* | 1,810 | 1,787 | 1,816 | Arsenoclasita |
| *462* | 1,815 | 1,775 | 1,825 | Pascoita |
| *463* | 1,816 | 1,776 | 1,836 | Acmita |
| *464* | 1,822 | 1,786 | 1,833 | Ferrohortonolita |
| *465* | 1,825 | 1,788 | 1,830 | Hancoquita |
| *466* | 1,831 | 1,800 | 1,846 | Higginsita |
| *467* | 1,836 | 1,805 | 1,846 | Manganfayalita |
| *468* | 1,838 | 1,805 | 1,847 | Knebelita |
| *469* | 1,838 | 1,809 | 1,859 | Linarita |
| *470* | 1,840 | 1,733 | 1,845 | Calcosiderita |
| *471* | 1,84± | 1,80± | 1,85± | Knebelita |
| *472* | 1,842 | 1,825 | 1,857 | Dietzeita |
| *473* | 1,846 | 1,792 | 1,864 | Iddingsita |
| *474* | 1,850 | 1,847 | 1,850 | Romeita |
| *475* | 1,861 | 1,831 | 1,880 | Atacamita |
| *476* | 1,864 | 1,824 | 1,875 | Fayalita |
| *477* | 1,870 | 1,670 | 1,895 | Tyuyamunita |
| *478* | 1,875 | 1,655 | 1,909 | Malaquita |
| *479* | 1,877 | 1,835 | 1,886 | Fayalita |
| *480* | 1,895 | 1,78 | 1,92 | Tyuyamunita |
| *481* | 1,925 | 1,750 | 1,95 | Carnotita |
| *482* | 1,927 | 1,75 | 1,965 | Tyuyamunita |
| *483* | 1,930 | 1,886 | 1,939 | Fersmanita |
| *484* | 1,961 | 1,947 | 1,968 | Alamosita |

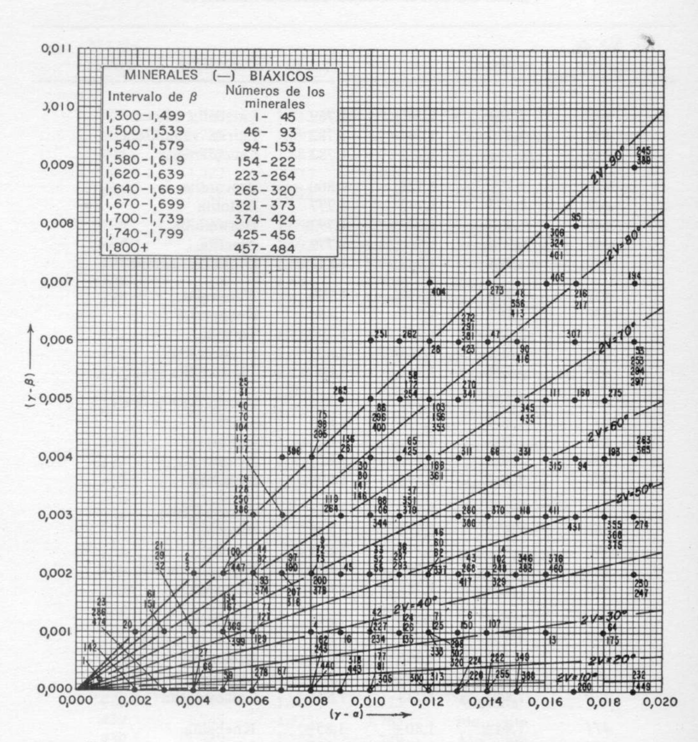



FIGURA II-6

**Diagrama para la determinación de los cristales biáxicos negativos ($\gamma - \alpha$) desde 0,000 a 0,019. Consúltese la tabla II-4 para la identificación de los números de código usados en el diagrama.**

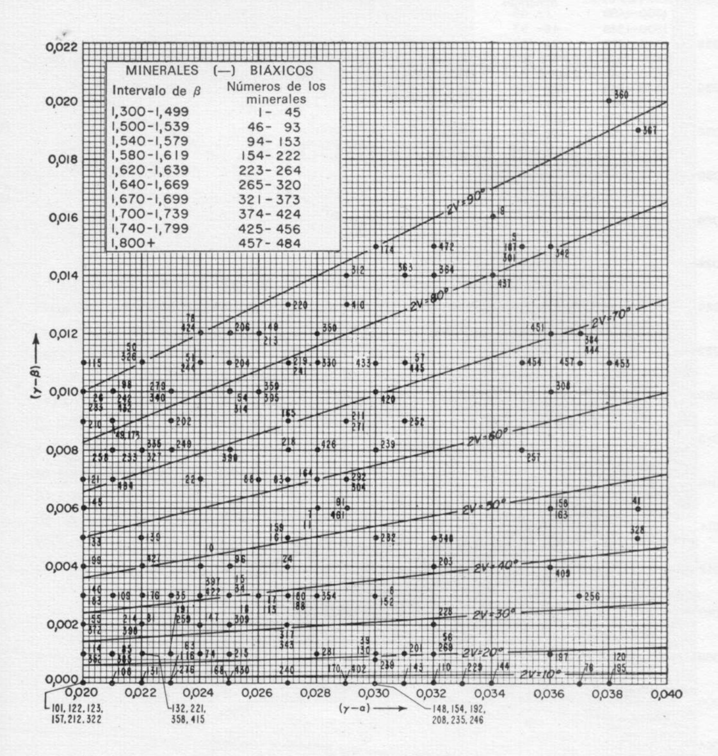



FIGURA II-7

**Diagrama para la determinación de los cristales biáxicos negativos ($\gamma - \alpha$) desde 0,020 a 0,039. Consúltese la tabla II-4 para la identificación de los números de código usados en el diagrama.**

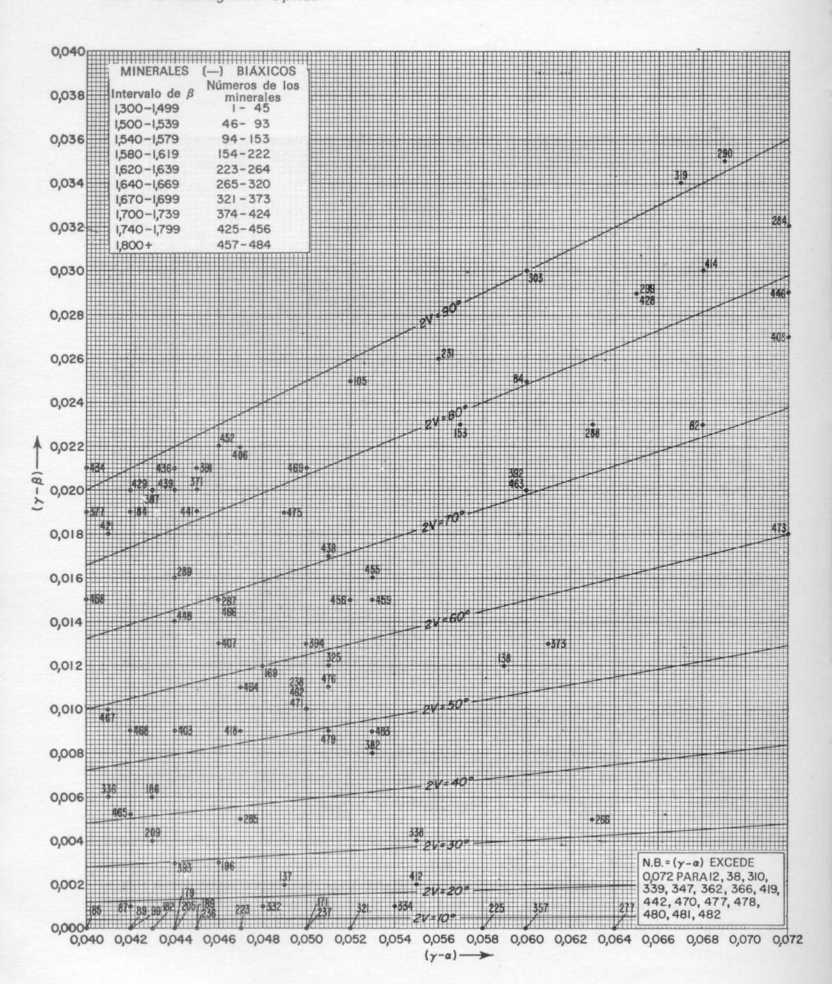



FIGURA II-8

**Diagrama para la determinación de los cristales biáxicos negativos ($\gamma - \alpha$) desde 0,040 a 0,072. Consúltese la tabla II-4 para identificar los números de código usados en el diagrama.**

# APENDICE III

# Recopilación de datos

El formato de impreso de la página siguiente proporciona un método conveniente para la rápida recopilación de los datos ópticos medidos y sirve como término de comparación para otras observaciones. Los datos de un mineral determinado se reúnen sólo en una de las tres columnas de contorno grueso; la columna de la izquierda se reserva para los isótropos, la central para los uniáxicos y la de la derecha para los biáxicos. A modo de ejemplo, la serie de medidas obtenidas de un mineral biáxico han sido reunidas en la columna de la derecha. Además de los datos contenidos dentro de la columna, se han indicado las observaciones macroscópicas en lugares al efecto. La columna para la densidad del aceite puede emplearse si se conoce el intervalo de la densidad del aceite. Una flecha dirigida hacia abajo en esta columna indica que el grano se hunde en el aceite y que, por tanto, tiene una densidad mayor; una flecha dirigida hacia arriba indica lo contrario.

## DATOS MACROSCOPICOS

Colores reflejados:
a) del cristal
b) de la raya o el polvo
Peso específico:
Dureza: Exfoliación:

Esquemas de las monturas en aceite

(1) (2) (3) (4) (5) (6) (7) (8) (9)

## DATOS MICROSCOPICOS

| Datos del aceite de la montura | | | | Isótropos | Anisótropos | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | Uniáxicos: +, — | | Biáxicos: +, — | | |
| N.° en el esquema | Indice en la etiqueta (25°) | P.e. del aceite | Temp. de la montura | $n$ | $\omega$ | $\epsilon$ | $\alpha$ | $\beta$ | $\gamma$ |
| (1) | 1,550 | | 23° | | | | Todos mayores (») que el aceite | | |
| (2) | 1,650 | | 23° | | | | >> | >> | >> |
| (3) | 1,700 | | 23° | | | | < | < | > |
| (4) | 1,695 | | 23° | | | | < | > | > |
| (5) | 1,695+1,700 | | 22° | | | | < | Igual | > |
| (6) | 1,690 | | 21° | | | | Igual | | |
| (7) | 1,730 | 3.20 | 22° | | | | | | < |
| (8) | 1,715 | (el grano | 23° | | | | | | > |
| (9) | 1,720 | se hunde) | 23° | | | | | | Igual |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Indice no corregido del aceite: | | | | 1,690 | 1,698 | 1,720 |
| Indice con corrección de temperatura: | | | | 1,692 | 1,699 | 1,721 |
| Color transmitido: | | | | Verde pálido | Pardo | Verde |
| Absorción relativa de la luz: | | | | Mínima | Máxima | Moderada |

Angulos $2V$ y $2E$ determinados con el monograma de Mertie a partir de las medidas con corrección de temperatura de $\alpha$, $\beta$, y $\gamma$: $2V = 58°$ $2E = 111°$

Angulos $2V$ y $2E$ medidos a partir de las figuras de interferencia usando el método de Kamb, Mallard o Tobi (indíquese cuál): $2V =$ $2E =$

Maclas observadas: ninguna

Inclusiones (orientación y tipo):

Exfoliación o fractura: Prismática

Signo del alargamiento de los cristales o fragmentos: +

Tipo de extinción a) Paralela: b) Simétrica: c) Oblicua (ángulo máximo): $Z \wedge c = 40°$

Dispersión: $r < v$
$r > v$

Simetría de las franjas de dispersión a lo largo de las isogiras en las figuras de interferencia:

- a) Dos planos (ortorrómbica) ☐
- b) Inclinada (monocl., eje bi = Υ) ☐
- Cruzada (monocl., eje bi = B.A.) ☐
- Paralela (monocl., eje bi = B.O.) ☐
- c) Sin planos (triclínica) ☐

Identidad del mineral: #319, Salita

FIGURA 3-1

**Impreso para resumir los datos obtenidos. Los datos obtenidos del polvo de diópsido (variedad salita) se han escrito a fin de demostrar el uso del impreso.**